

PORTADA

p-ISSN: 1390-6143, e-ISSN: 2477-8893

Tamaño de la página: 21.0 x 29.7 cm

Margen: 2.54 cm a los cuatros lados

Tamaño final: 100% original

Vol. 9 / No. 2 / Diciembre 2018

p-ISSN: 1390-6143

e-ISSN: 2477-8893

Universidad de Cuenca
Dirección de Investigación - DIUC

MASKANA (*búsqueda* en quechua), el nombre de la revista científica de la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca (DIUC), se refiere directamente a la definición de *investigación*, que en el sentido más amplio se entiende como la búsqueda del avance del conocimiento a través de la recopilación de datos, información y hechos.

MASKANA (*searching* in quechua), the name of the scientific journal of the Research Directorate of the University of Cuenca (DIUC), relies directly to the definition of *research*, which in the broadest sense means *searching* for advancement in knowledge via gathering of data, information and facts.

MASKANA • Volumen 9 • Número 2 • julio-diciembre 2018

Indexada en Latindex

Revista semestral de Ciencias Humanas y Sociales, Biológicas y de la Salud, Exactas y Tecnologías de la Universidad de Cuenca (UC). Publicación internacional, bilingüe, revista electrónica con acceso abierto (<https://www.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana>). En este sitio web se puede descargar la guía para autores (en español o inglés). Las ideas y opiniones expresadas en las colaboraciones son de exclusiva responsabilidad de los autores y autoras.

Consejo Editorial UC

Mauricio Espinoza (PhD)

Dirección de Investigación, UC

Edison Timbe (PhD)

Dirección de Investigación, UC

Miembros

Adriana Orellana (PhD)

Facultad de Ciencias Médicas, UC

Esteban Samaniego (PhD)

Facultad de Ingeniería, UC

Hubert B. Van Hoof (PhD)

Ciencias de la Hospitalidad, Pennsylvania State University, USA

Jan Feyen (PhD)

Facultad de Bioingeniería, Universidad Católica de Lovaina, Bélgica

José L. Crespo Fajardo (PhD)

Universidad de Sevilla, España

Lourdes Huiracocha (Dra)

Facultad de Ciencias Médicas, UC

Ricardo Alberio (PhD)

Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional Mar del Plata, Argentina

Rodrigo Mendieta (PhD)

Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas,

Verónica Pinos (PhD)

Facultad de Ciencias Químicas, UC

Bajo el auspicio de

Pablo Vanegas Peralta (PhD), Rector UC

Catalina León Pesántez (PhD), Vicerrectora UC

Impresión: SelfPrint

Copyright: Los artículos de este volumen se distribuyen bajo Creative Commons Attribution 4.0 License: los autores conservan los derechos de autoría de los artículos y otorgan a la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca (DIUC) una licencia irrevocable no exclusiva para publicar el artículo electrónicamente y en formato impreso y para identificarse como el editor original.

MASKANA: Directrices para los autores¹

1. Información general

La edición de la revista es semestral. Los artículos deben ser originales y no deben encontrarse bajo evaluación en otras revistas. Los artículos pueden estar escritos en español o en inglés y podrán presentarse por correo (maskana.diuc@ucuenca.edu.ec) en cualquier momento del año. Los manuscritos presentados pasan por un proceso de revisión y los autores son informados sobre la aceptabilidad del artículo para su publicación. Si el artículo es aceptado con menores o mayores revisiones los autores reciben las sugerencias correspondientes sobre cómo mejorar el contenido y la redacción del manuscrito.

2. Estructura del manuscrito

La estructura de manuscritos con datos experimentales debe seguir el siguiente esquema: Título; Lista de autores; Afiliación de los autores; Resumen; Palabras clave; Abstract; Keywords; Introducción; Materiales y métodos; Resultados y discusiones; Conclusiones; Agradecimientos; y. Bibliografía. En caso de tratarse de artículos de reflexión o de revisión de la literatura la estructura se reduce a: Título; Lista de autores; Afiliación de los autores; Resumen; Palabras clave; Abstract; Keywords; Introducción; una o más secciones sobre los aspectos para los que el(los) autor(es) propone(n) la investigación; Conclusiones; Agradecimientos; y, Bibliografía.

3. Instrucciones de escritura

- Los artículos se presentan en formato MS Word.
- Diseño de página: tamaño A4, márgenes de 2.54 cm en todos los lados de la página, páginas numeradas.
- Longitud del manuscrito: máximo 10,000 palabras incluyendo todas las secciones.
- Título: 10 a 12 palabras; escrito como una etiqueta, mas no como una frase.
- Lista de autores y la dirección de afiliación.
- Dirección de correo electrónico del autor para correspondencia.
- Resumen: máximo 250 palabras, escrito como un párrafo.
- Palabras clave: menos de 7 palabras.
- Limite la subdivisión de cada sección del manuscrito en un sólo nivel (1.1., 1.2., 1.3., 2.1, 2.2., etc.).
- Tipo y tamaño de letra: Times New Roman, 11 puntos para el texto y 10 puntos para las notas de pie de página.
- Espaciado entre líneas de texto: 1.5 y sencillos en tablas, apéndices y referencias bibliográficas. Introducir una línea en blanco entre cada sección del artículo, no entre párrafos. Activar en MS Word, la opción de numerado de cada línea en cada página.
- Tablas, figuras, fotografías y mapas: Presente únicamente resultados relevantes, que son necesarios para comprender mejor el texto. En un artículo consta normalmente más texto que ilustraciones.
- Tablas: Las tablas no contienen líneas verticales. Se recomienda el uso del punto como signo separador de los decimales, y el uso de una coma para marcar miles en números.
- Figuras, mapas y fotografías: El texto en ilustraciones debe ser legible, y las ilustraciones de alta calidad. La resolución mínima de ilustraciones es 300 dpi, y el formato preferible es JPEG o TIFF.
- Modo de citar autores en el texto: Goffman (1987); Iannconne & Alvarño (2005); Baroody *et al.* (2012); (Aunio & Niemivirta, 2010; De Smedt *et al.*, 2009; Duncan *et al.*, 2007; Geary, 2011).
- Bibliografía:
Artículos: Robinson, G. L., & Miles, J. (1987). The use of colored overlays to improve visual processing: A preliminary survey. *The Exceptional Child*, 34(1), 65-70.
Libros: Montgomery, D. C., Johnson, L. A., & Gardiner, J. S. (1990). *Forecasting and time series analysis* (2ª ed.). New York, NY: McGraw-Hill Publ. Comp., 367 pp.
Capítulos de libros: Geo-JaJa, M. A., & Azaiki, S. (2010). Development and education challenges in the Niger Delta. In: Hui Xu, Lou, S., & Xiu Lan Wan (Eds.). *Studies in African Education*. Hangzhou: Zhejiang University Press, pp. 210-228.
Ponencias en congresos: Hangartner, M., Burri, P., & Monn, C. (1989). *Passive sampling of nitrogen dioxide, sulphur dioxide, ozone ambient air*. In: Brasser, L. J. (Ed.), *Proceedings of the 8th World Clean Air Congress Man and His Ecosystem*, The Hague, The Netherlands, pp. 681-686.
Fuentes de Internet: W3C, 2009. *Public-rdf-in-xhtml-tf*. Descargado de <http://lists.w3.org/Archives/Public/public-rdf-in-xhtml-tf/2009Aug/thread.html> el 26 de octubre de 2014.

¹ El documento completo de las directrices para los autores está disponible en <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/>

Contenidos

Vol. 9, No. 2, Diciembre 2018

A case study of learning strategies of older adults attending an English course Juan F. Mora, Isabel R. Quito, Louis E. Macías, María I. Fárez, María E. Quinde	1-8
Aplicación del modelo de Christaller para la distribución espacial de supermercados Iván F. Palacios Orejuela	9-16
La Estrategia del Océano Azul y su relación con el Negocio Inclusivo del reciclaje en la ciudad de Cuenca, Ecuador Gabriela López. A, Lourdes S. Carvallo, José S. Jimbo	17-26
Comparación de las eficiencias de recuperación de lípidos de las microalgas <i>Chlorella</i> y <i>Scenedesmus</i> obtenidas con diferentes disolventes María J. Pérez, Jenny Quishpi, Guillermina Pauta, Fabián León, Juan F. Cisneros, Verónica Pinos, Andrés Alvarado	27-34
Niveles de cadmio en atún fresco y enlatado para consumo humano en Ecuador Evelyn Flores, Wilson Pozo, Beatriz Pernía, Williams Sánchez	35-40
A province with several climates: What knowledge of hydrology can be useful? A literature review Andy M. Giler-Ormaza	41-51
Umbrales en la respuesta de humedad del suelo a condiciones meteorológicas en una ladera Altoandina Daniel Tenelanda Patiño, Patricio Crespo Sanchez, Giovanny Mosquera Rojas	53-65
Modelación unidimensional no estacionaria de un río de alta montaña al sur de Ecuador Ana Ochoa-Sánchez, Luis Timbe, Angel Vázquez-Patiño, Esteban Samaniego	67-74
Aplicación de ecuaciones de estado cúbicas y desarrollo de correlaciones numéricas para el cálculo de propiedades termodinámicas en saturación de refrigerantes para su uso en microcontroladores Javier García del Valle	75-88

Revista semestral de la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca (DIUC), Cuenca, Ecuador

p-ISSN: 1390-6143 / e-ISSN: 2477-8893

© Author(s) 2018. CC Attribution 4.0 License

Revista semestral de la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca (DIUC), Cuenca,
Ecuador

p-ISSN: 1390-6143 / e-ISSN: 2477-8893

© Author(s) 2018. CC Attribution 4.0 License



A case study of learning strategies of older adults attending an English course



Juan F. Mora¹ , Isabel R. Quito¹ , Louis E. Macías¹ , María I. Fárez² ,
María E. Quinde²

¹ Instituto Universitario de Lenguas, Universidad de Cuenca, Av. 12 de abril, Cuenca, Ecuador.

² GIER, Universidad de Cuenca, Av. 12 de abril, Cuenca, Ecuador.

Autor para correspondencia: fernando.mora@ucuenca.edu.ec

Fecha de recepción: 6 de noviembre de 2018 - Fecha de aceptación: 11 de noviembre de 2018

ABSTRACT

This study explores the most frequently used learning strategies of a group of older adults in the city of Cuenca, Ecuador, attending an English course. Sixty-six participants (with an average age of 71.05) responded to the 50-item questionnaire on learning strategies of Oxford (1990). Statistical analyses and an analysis of correlation between sociodemographic variables were conducted to determine the prevailing learning styles of the intervention group and its relationship with the sociodemographic characteristics of the participants. The results indicate that older adults use all the strategies categorized by Oxford, predominantly the metacognitive ones, meaning that they mainly reflect, plan, monitor, and evaluate their own learning process. In addition, the results reveal the positive correlation of the variables age, level of English, and level of education and occupation before retirement. The three last-mentioned were found to be determinant in the preferences of the participants.

Keywords: Older adults, learning strategies, lifelong learning, EFL.

RESUMEN

Este estudio examina las estrategias de aprendizaje más utilizadas por un grupo de adultos mayores en la ciudad de Cuenca, Ecuador. Sesenta y seis participantes (con una edad promedio de 71.05) que tomaron un curso de inglés como lengua extranjera respondieron al cuestionario de 50 preguntas sobre estrategias de aprendizaje de Oxford (1990). Se realizaron análisis estadísticos y un análisis de correlación entre las variables sociodemográficas para determinar los estilos de aprendizaje prevalentes del grupo de intervención y su relación con las características sociodemográficas de los participantes. Los resultados indican que los adultos mayores utilizan todas las estrategias categorizadas por Oxford, de manera particular las metacognitivas, lo que significa que principalmente reflexionan, planifican, monitorean y evalúan su propio proceso de aprendizaje. Además, los resultados revelan la correlación positiva de las variables edad, nivel de inglés y nivel de educación y ocupación antes de la jubilación. Se evidenció que las tres últimas fueron determinantes en las preferencias de los participantes.

Palabras clave: Adultos mayores, estrategias de aprendizaje, aprendizaje permanente, EFL.

1. INTRODUCTION

The study of learning strategies has been widely reported, particularly regarding the benefits of using them in an academic setting. It is important to start by providing a definition of learning strategies. A pertinent definition is that of Dansereau (1985), who conceives them as “a set of processes or steps which might facilitate the acquisition, storage and use of information”. Another important definition is provided by Monereo (1994), who states that learning strategies are “planned behaviors which select and organize cognitive, affective, and motor mechanisms in order to cope with global or specific learning situations”. On the other hand, some consider the expression *learning strategies* to be a synonym of the terms *learning behaviors*, *tactics*, *resources*, *skills*, and others (Griffiths, 2008), while others regard them as different (Gómez, 2013), stating that learning techniques are specific activities students use mechanically, whereas learning strategies are the reflective use of those

techniques. In the field of foreign languages, Rebecca Oxford, a very well-known researcher in learning strategies, points out that such terms can be defined as “specific actions taken by the learner to make learning easier, faster, more enjoyable, more self-directed, more effective, and more transferable to new situations” (Oxford, 1990). This definition is the one that informs the development of this study.

Among the benefits of learning strategies, some studies suggested that their frequent, varied, and efficient use might result in an improvement of the students’ performance in general terms (Zimmerman & Pons, 1986; Pressley & Associates, 1990; Barca, Peralbo, Porto, Barca, Santorum, & Castro, 2013), and also in language learning (O’Malley & Chamot, 1990; O’Malley & Chamot, 1994; Park, 1997; Oxford, 2003; Anderson, 2005; Nisbet, Tindall, & Arroyo, 2005; Gómez, 2013). In the latter area, students tend to improve their performance even more when their instructors not only teach the target language, but also when they focus on building awareness on the use



of strategies (O'Malley & Chamot, 1994; Nunan, 1996; Oxford, 1996a; Kinoshita & Dokkyo, 2003), so that students can choose the ones that best help them achieve their learning goals (Anderson, 2005). Another relevant aspect to take into account is age since the older people are, the more strategies it seems they tend to develop (Skehan, 1989; Oxford, 1990; Ellis, 1994; Quarles, 1998; Chamot, Kupper, & Impink-Hernandez, 1998; Yang, 2007) and use them more efficiently (Devlin, 1996; Lee & Oxford, 2008); this is why age together with learning strategies are considered the two major variables (together with learning strategies) that contribute to the process of second language acquisition (Ellis, 1994).

One of the most prominent researchers on language learning strategies is Rebecca Oxford, who makes a distinction between direct and indirect strategies. Direct strategies are the ones “that directly involve the target language,” meaning that they “require mental processing of the language” (Oxford, 1990), while indirect strategies “provide indirect support for language learning through focusing, planning, evaluating, seeking opportunities, controlling anxiety, increasing cooperation and empathy, and other means” (Oxford, 1990). The author identifies six groups within these strategies, namely:

Direct strategies:

1. Cognitive strategies help students to take advantage of the language material in direct ways. Analysis, note-taking, outlining, reasoning, reorganizing information, summarizing, and synthesizing are examples of this type of strategies.
2. Memory-related strategies help learners enter and retrieve new information by creating mental linkages between images and sounds in their memory. These strategies include grouping words, placing new words into context, using imagery, or using physical response, among others.
3. Compensation strategies represent ways in which students deal with gaps in existing knowledge, such as guessing in reading and listening, using synonyms in speaking and writing, and using gestures in speaking.

Indirect strategies:

1. Metacognitive strategies are ways in which students regulate their own learning processes. These involve reflecting, planning, monitoring, and evaluating such processes.
2. Affective strategies are those meant to manage one's emotions, like coping with anxiety, expressing feelings, encouraging and rewarding oneself when performing well, and relaxing.
3. Social strategies help learners tackle language issues by interacting with others through asking questions, cooperating, and empathizing in the group.

Under these premises, Oxford (1989) designed her Strategy Inventory for Language Learning (SILL), featuring 50 quantitative, close-ended questions, aiming to identify the most frequent strategies used by language learners. This questionnaire has been widely used since it was released (Dörnyei, 2005; White, Schramm, & Chamot, 2007), and it has been translated into several languages (Oxford, 1996b).

Findings about learning strategies used by learners in languages, and other fields, have been reported worldwide. However, there is limited information about the strategies

used by older adults, particularly when learning a foreign language. Therefore, this study attempts to determine the learning strategies of a group of elders who took an English course in Cuenca, as well as to ascertain to what extent their language learning strategies are influenced by the socio-demographic variables such as age, knowledge level of English before taking the course, level of education, and occupation before retirement.

2. METHODOLOGY

2.1. Participants and context

The participants were 66 senior citizens taking a six-month English course at the University of Cuenca, in Ecuador, during the 2014-2015 academic year. This course was taught as part of a research project aiming to assess the effects of learning English upon the cognitive processes of older adults (Estévez *et al.*, 2016). The participants took a placement test before the beginning of the course and then three classes were offered: one called *Starter*, for those who had never taken English classes before (32 participants); another called *Elementary*, for those who had some knowledge of English, equivalent to level A1 of the Common European Framework of References for Languages (CEFR) (Council for Cultural Cooperation, 2001) (15 participants); and one called *Pre-Intermediate*, featuring older adults who could have conversations in English about topics that were familiar or of personal interest, equivalent to level B1 of the CEFR (19 participants).

The average age of this group of older adults was 71.05, of which 5 participants had attended primary school only, 40 secondary school, and 21 college; furthermore, 23 were blue-collar workers before retirement, while 43 were white-collar workers. Table 1 summarizes the participants' socio-demographic profile:

Table 1. Participants' socio-demographic profile.

Parameter	Group	n	%
Age range	65-70 years	39	59
	71-80 years	25	38
	81-85 years	2	3
Gender	Male	28	42
	Female	38	58
School level	Elementary	5	8
	High school	40	60
	University	21	32
Occupation before retirement	Blue-collar workers	23	35
	White-collar workers	43	65

2.2. Data collection

The instrument used to determine the learning strategies of the participants was the SILL by Oxford (1990). This 50-item questionnaire comprises a set of six sections assessing the frequency with which learners use direct and indirect strategies: memory (9 questions: 1-9), cognitive (14 questions: 10-23), compensation (6 questions: 24-29), metacognitive (9 questions: 30-38), affective (6 questions: 39-44), and social (6 questions: 45-50). The participants responded using a five-point Likert scale, in which 1 means *never or almost never true of me*, 2, *usually not true of me*, 3, *somewhat true of me*, 4, *usually true of me*, and

5, *always or almost always true of me*. The score obtained establishes the strategies used at high (average score of 3.5 to 5), medium (2.5 to 3.4), and low (2.4 and below) levels.

Since this course was taught within the framework of a research project, the participants had already been told at the beginning of the course that, besides usual English tests, a number of surveys and questionnaires would be administered in the classroom at different times. The researchers had the participants engaged in different course activities for several weeks, expecting that their responses to the SILL would resemble the learning experience they were undergoing in that moment. Then, in the fourth month of the course, the questionnaire was applied. This instrument was translated into Spanish by the researchers so that the senior citizens, especially those in the Starter and Elementary groups, could feel confident enough to fully understand the questions and give suitable answers.

3. ANALYSIS AND RESULTS

The average response of the participants regarding their most frequently used strategies when learning English is shown in Fig. 1. The results feature the six types of language learning strategies established by Oxford (1990): memory, cognitive, compensation, metacognitive, affective, and social. As can be seen, the participants use memory, cognitive, compensation, affective and social strategies at a medium level, while they are high users of metacognitive strategies. These findings mean that older adults tend to recall information by producing mental pictures and sounds in their memory; they also employ strategies like note-taking, outlining, summarizing, among others, and when they lack knowledge, they compensate for it by guessing, using synonyms or gestures; furthermore, they control the feelings they experience while learning, and they interact with their peers when facing language issues. And, at a greater extent, the participants reflect, plan, monitor and evaluate their learning process when attending the English course.

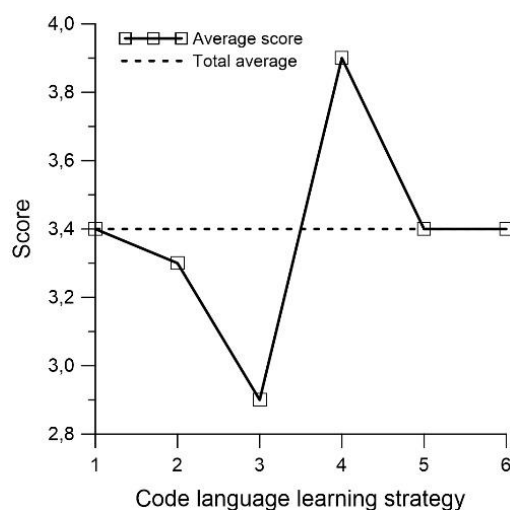


Figure 1. Average score of language learning strategies of older adults. Code language learning strategy: 1 = Memory-related strategies; 2 = Cognitive strategies; 3 =

Compensation strategies; 4 = Metacognitive strategies; 5 = Affective strategies; 6 = Social strategies.

After determining the language learning strategies of the participants, a correlation of such strategies with some sociodemographic variables was carried out. The statistically significant correlations are outlined in the following sections.

Level of English language proficiency and language learning strategies

According to the results of an English placement test, as mentioned before, the participants were assigned to three groups: starter, elementary, and pre-intermediate. Figure 2 shows that the beginners use metacognitive and memory strategies at a high level, and compensation strategies at a medium level. Regarding the elementary learners, the data reveal that their high level of preference is for the cognitive, metacognitive, affective, and social strategies, while they adopt compensation strategies at a medium level. Finally, the pre-intermediate students use metacognitive and social strategies at a high level, while

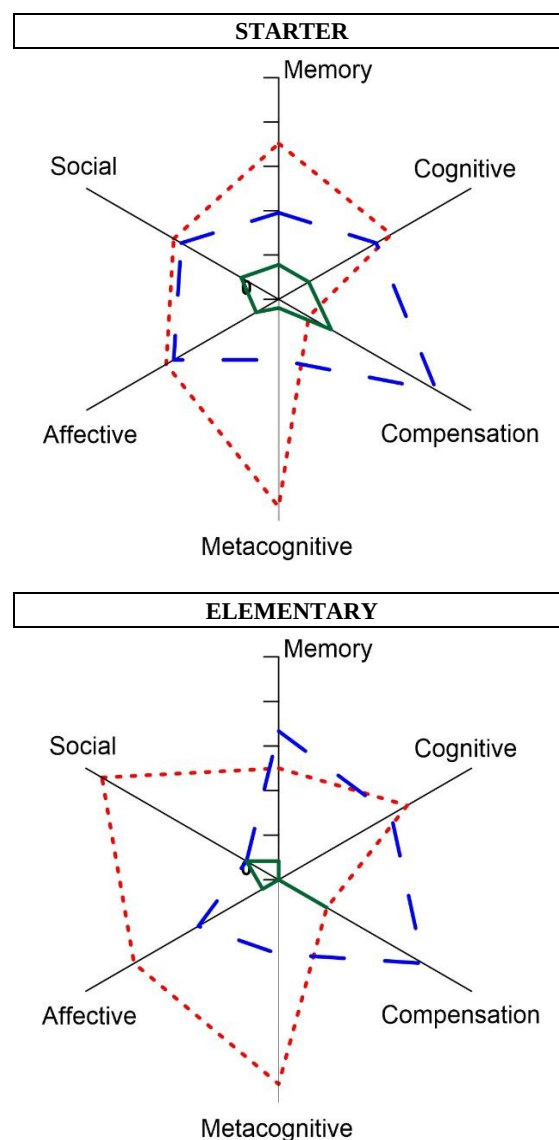


Figure 2. Absolute level values of strategy use according to the students' English proficiency, respectively at STARTER, ELEMENTARY and PRE-

INTERMEDIATE level. Dotted red line: HIGH, large dot blue line: MEDIUM, and full green line: LOW.

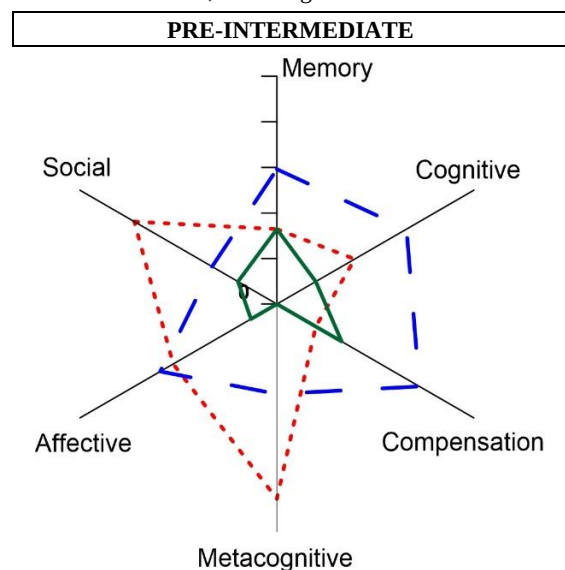


Figure 2. (continued)

using the rest of strategies at a medium level. Besides the above analysis, an ANOVA test¹ and the Scheffe Test² were applied in order to compare the groups regarding their use of learning strategies. The results, however, do not show statistical differences.

In order to provide more detail about the strategies most and least used by the participants, Table 2 below shows those with a high use (higher than 3.5 points) and those with a minimum use (lower than 2.4 points). As mentioned before, metacognitive strategies (questions 30-38) are the ones the participants use the most and, among them, the strategy the participants predominantly use is *I pay attention when someone is speaking English*, while the least used strategies belong to the memory and compensation groups.

Table 2. Average of the most and the least used strategies.

No	Question	Avg	Level
32	I pay attention when someone is speaking English	4.39	High
33	I try to find out how to be a better learner of English	4.26	High
8	I review English lessons often	4.11	High
31	I notice my English mistakes and use that information to help me do better	4.08	High
38	I think about my progress in learning English	4.11	High
5	I use rhymes to remember new English words	2.33	Low
27	I read English without looking up every new word	2.31	Low

Table 5. Students' T-test distribution between occupation before retirement and language learning strategies (top: AVG_A; bottom: AVG_B).

26	I make up new words if I do not know the right ones in English	2.25	Low
----	--	------	-----

Age and language learning strategies

To determine the correlation of between age and the average of use of language learning strategies, an analysis based on the Pearson correlation coefficient was applied. The results show that there is not a significant correlation between the above variables. However, when applying the

Table 3. Correlation of age and language learning strategies of the elementary learners (N=15).

Parameter	Pearson correlation	Sign. (two-tailed)
AGE	1	
AVG_A	-.297	.283
AVG_B	-.389	.152
AVG_C	-.431	.109
AVG_D	-.357	.192
AVG_E	-.178	.525
AVG_F	-.646**	.009

same analysis to each of the groups of students, according their level of English, the results show a statistically significant and moderate indirect correlation of the age of the elementary learners and their social learning strategies. This indicates that the older the elementary learners are, the less likely they are to use these strategies to learn English.

Level of education and occupation before retirement and language learning strategies

Table 4 shows the results of an ANOVA test, which reveals that there is a statistically significant difference

Table 4: Correlation of levels of education and language learning strategies of the pre-intermediate learners.

Source of variation	Sum squares	DF	Mean square
AVG_A			
Between groups	1.313	1	1.313
Within groups	4.473	17	0.263
Corrected total	5.786	18	
F (variance ratio) = 4.991 p = .039			
AVG_B			
Between groups	1.718	1	1.718
Within groups	4.240	17	0.249
Corrected total	5.959	18	
F (variance ratio) = 6.888 p = .018			
AVG_C			
Between groups	0.948	1	0.948
Within groups	3.459	17	0.203
Corrected total	4.407	18	
F (variance ratio) = 4.660 p = .045			

¹ Analysis of Variance (ANOVA) is a statistical method to test general rather than specific differences between two or more means.

² The Scheffe Test is a post-hoc test used in analysis of variance to find out pairs of means that are significant.

AVG_A		Equal variances assumed	Equal variances not assumed
Levene's test for equality of variances	F	0.141	
	Sig.	0.708	
T-test for equality of means	t	2.425	2.413
	DF	45.726	64
	Sig. (2-tailed)	0.019	0.019
	Mean difference	0.4585505	0.4585505
	Std. error difference	0.1890818	0.1900417
95% conf. interval of the difference	Lower	0.0778869	0.0788985
	Upper	0.8392140	0.8382024

AVG_B		Equal variances assumed	Equal variances not assumed
Levene's test for equality of variances	F	2.800	
	Sig.	0.099	
T-test for equality of means	t	2.145	1.964
	DF	57.038	64
	Sig. (2-tailed)	0.036	0.054
	Mean difference	0.3309162	0.3309162
	Std. error difference	0.1542948	0.1684748
95% conf. interval of the difference	Lower	0.0219505	0.0056509
	Upper	0.6398818	0.6674833

($p < 0.05$) between the levels of education and the averages of memory-related, compensation, and affective strategies of pre-intermediate learners. It is important to mention that these students attended high school and university; the data indicate that those who went only as far as secondary school seem to use the previously mentioned strategies more often than those who achieved a higher degree of education.

Table 5, on the other hand, indicates the results of a Student's t -test⁴, which show that the averages of memory-related and cognitive strategies are correlated to the variable occupation before retirement. The data reveal that those who used to be white-collar workers use those strategies more frequently than those who were blue-collar workers before retirement.

4. DISCUSSION

The main target of this study was to determine the learning strategies of a group of elders who were part of an English course in Cuenca, and their possible correlation with the variables age, level of English, level of education and occupation before retirement. Even though this study is exploratory, and therefore could be considered not representative, it may offer useful information on the correlations between the most frequently used strategies of senior citizens and their socio-demographic characteristics, and thus provide research questions for future studies on lifelong learning.

In order to find out the most common strategies used by the group of older adults, the SILL by Oxford was used. The results of this questionnaire reveal that the participants use memory, cognitive, compensation, affective and social strategies at a medium level and metacognitive strategies at a high level. These findings are consistent with those by Quarles (1998), which indicated that in a study conducted

over a group of 98 senior citizens, metacognition was their second-most-used strategy, after *metamotivation* (being aware of their reasons for participating in educational programs). Likewise, Castro (2011) found in a group of 89 university students, majoring engineering and technology, a high use of metacognitive strategies in an EFL context and a medium use of the remaining ones. Similarly, Nisbet, Tindall, & Arroyo (2005) conducted a study with 168 third-year English majors which indicated that metacognitive strategies were the most frequently used, followed by the social and cognitive ones (high strategy use range), while compensation, affective and memory-related strategies featured a medium strategy use range. These studies are mentioned since their participants had already gone through elementary and middle school, meaning that metacognitive strategies are probably mostly handled by individuals with learning experience rather than beginners (Fernández-Castillo, 2015). This assertion is supported by the findings of the two cases previously cited as well as the foregoing study, since all of them included adults who had already attended at least primary school. These outcomes differ, however, from those reported by Chen (2014), which did not find significant differences between the frequency of use of metacognitive strategies of Taiwanese learners in elementary school and university in a study carried out with 1,023 participants from four levels of education.

When analyzing the learning preferences of the present group of older adults and their sociodemographic variables, three correlations were found to be statistically significant:

1. Level of English language proficiency and language learning strategies: the data of this study suggest that the metacognitive strategies are used in all the English levels (starter, elementary, and pre-intermediate). The participants clearly perform a high use of this strategy. On the other hand, the results of the questionnaire indicate that those

⁴ A test for statistical significance that uses tables of a statistical distribution called Student's t -distribution.

regarded as starters seem to use memory strategies at a high level too, while the same strategy is moderately used by the elementary and pre-intermediate learners. This might be explained by the language process itself: as participants step forward within this process, the use of memory strategies is gradually replaced by the other strategies (Ellis, 1994; Gavrilidou & Psaltou-Joycey, 2009). These interpretations are supported by similar findings like those of Quarles (1998), Griffiths and Parr (2001), Salem (2006), Salahshour, Sharifi, & Salahshour (2013), Zarei & Baharestani (2014), and Al-sohban (2018) who indicated that memory strategies were used by the individuals in their study far less frequently than were other strategies.

2. Age and language learning strategies: age is another variable that seems to influence language learning strategies among older adults. This study suggests that older learners are not likely to use social strategies. This might be because confidence increases with age, while self-esteem is gained through experience, which is acquired within the learning process (Skehan, 1989). These findings are in line with those of Quarles (1998), Marins (2010), Wu (2011), Sadeghi & Attar (2013), and Sadeghi & Khonbi (2012), whose studies showed that when the participants started learning the target language, they tended to use social strategies frequently, but as they got older their preference for that strategy diminished.
3. Level of education and occupation before retirement and language learning strategies: the results of this study show that the participants with higher educational levels (white-collar workers) tend to use memory-related strategies more frequently than those with some high school education or less (blue-collar workers); furthermore, those who attended high school only seem to prefer memory-related, compensation, and affective strategies to a greater extent than those who had higher education. This might mean that memory-related strategies are primarily used by those who engage in learning processes, particularly when attending primary and secondary school, but then that strategy is little by little surpassed by other strategies as the individuals increase their level of education (Oxford, 2003). In the same vein, Quarles (1998), Griffiths & Parr (2001), Orrego & Díaz (2010), Castro (2011), Wu (2011), García & Vivas (2014), and Frankenmolen, Fasotti, Kessels, & Oosterman (2018) found that memory-related strategies were among the least used by the participants in their studies, most of whom were university students.

5. CONCLUSIONS

The results of this study might be helpful to teachers dealing especially with lifelong learning courses. Instructors can help their students by making them aware of different strategies and guiding them in selecting those most useful in achieving specific learning outcomes. In regard to the foregoing study, the strategy most frequently used by the group of older adults taking an English course is the metacognitive strategy; this seems to be the result of

their previous (and probably long) formal instruction, which led them to scaffold this strategy. It is worth pointing out that there are no good or bad strategies. Rather, teachers should be aware of how effective the strategies used by their students are in order to suggest other strategies, if applicable, or ways to improve and exploit them accurately. It might also be important to make students aware of their learning styles, so that they can use strategies that better fit such styles.

The main limitation of this study was the small number of participants; therefore, finding significant relationships from the data was difficult. The English courses offered specifically for older adults were the first ones provided by the University of Cuenca at that time. The small number of senior students was probably due to two factors: (a) the publicity of these courses was not advertised enough because of limited financial resources, and (b) since it was the first time this type of courses was offered in the city, the elder community was not aware enough about the benefits an English course might bring them. Therefore, it is suggested further research on how older adults may learn, particularly when attending a foreign language course.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors want to express their deep gratitude to Dr. Alan Blackstock because of his willingness, kindness, and support for the completion of this task.

REFERENCES

- Al-sohban, Y. (2018). Language learning strategy use by Turkish international school students in Yemen. *Journal of Teaching and Teacher Education*, 6(2), 95-106.
- Anderson, N. (2005). Estrategias para el aprendizaje de una lengua extranjera. *Káñina, Revista de Artes y Letras*, 29(1-2), 171-174.
- Barca, A., Peralbo, M., Porto, A. M., Barca, E., Santorum, R., & Castro, F. V. (2013). Estrategias de aprendizaje, autoconcepto y rendimiento académico en la adolescencia. *Revista Galego-Portuguesa de Psicoloxía e Educación*, 21, 195-212.
- Castro, I. (2011). *Language learning strategies for unsuccessful language learners in Ecuador*. Master's degree thesis. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Chamot, A., Kupper, L., & Impink-Hernandez, M. (1998). *A study of learning strategies in foreign language instruction: Findings of the longitudinal study*. McLean, VA: Interstate Research Associates.
- Chen, M. (2014). Age differences in the use of language learning strategies. *English Language Teaching*, 7(2), 144-151. doi:10.5539/elt.v7n2p144
- Council for Cultural Cooperation. (2001). *Common European framework for languages: Learning, teaching, assessment*. Strasbourg, Germany.
- Dansereau, (1985). *Learning strategy research*. In: J.W. Segal, S. F. Chipman, & R. Glaser (Eds.). *Thinking and learning skills* (Vol. 1): Relating instruction to research,

- 209-240. Florence, KY: Routledge, Taylor & Francis Group.
- Devlin, M. (1996). Older and Wiser? A comparison of the learning and study strategies of mature age and younger teacher education students. *Higher Education Research & Development*, 15(1), 51-60.
- Dörnyei, Z. (2005). *The psychology of the language learner: Individual differences in second language acquisition*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Ellis, R. (1994). *The study of second language acquisition*. Oxford: Oxford University Press.
- Estévez, F., Webster, F., Mora, F., García, J., Cisneros, V., & Cevallos, A. (2016). Impacto del aprendizaje del inglés sobre los procesos cognitivos en adultos mayores. Un estudio preliminar en Cuenca. *Revista Ecuatoriana de Neurología*, 24(1-3), 28-32.
- Fernández-Castillo, A. (2015). Estrategias de aprendizaje y adquisición de una segunda lengua. *REIDOCREA*, 4(48), 391-404.
- Frankenmolen, N. L., Fasotti, L., Kessels, R. P., & Oosterman, J. M. (2018). The influence of cognitive reserve and age on the use of memory strategies. *Experimental Aging Research*, 44(2), 117-134.
- García, M. & Vivas, A. (2014). Language learning strategies in foreign language learning and proficiency levels by teacher training university students. *Revista de Investigación Educativa*, 32(2), 363-378.
- Gavrilidou, Z. & Psaltou-Joycey, A. (2009). Language learning strategies: An overview. *JAL*, 25, 11-25.
- Griffiths, C. & Parr, J. (2001). Language-learning strategies: Theory and perception. *ELT Journal*, 55(3), 247-254.
- Griffiths, C. & Cansiz, G. (2008). Language learning strategies: An holistic view. *Studies in Second Language Learning and Teaching*, 5(3), 473-493.
- Gómez, B. (2013). *Las estrategias de aprendizaje en el aula de lengua extranjera*. Bachelor's thesis. Valladolid, Spain: Universidad de Valladolid.
- Kinoshita, Y. & Dokkyo, H. (2003). Integrating language learning strategy instruction into ESL/EFL lessons. *TESL Journal*, 9(4). Retrieved from <http://iteslj.org/Techniques/Kinoshita-Strategy.html>
- Marins, P. (2010). Estrategias de aprendizaje y desarrollo de la motivación: un estudio empírico con estudiantes de E/LE brasileños. *Porta Linguarum*, 14, 141-160.
- Monereo, C. (Coord.) (1994). *Estrategias de enseñanza y aprendizaje. Formación del profesorado y aplicación en la escuela*. Barcelona: Graó.
- Nisbet, D. L., Tindall, E. R. and Arroyo, A. A. (2005). Language learning strategies and English proficiency of Chinese university students. *Foreign Language Annals*, 38, 100-107.
- Nunan, D. (1996). Learner strategy training in the classroom: An action research study. *TESOL Journal*, 6(1), 35-41.
- O'Malley, M. & Chamot, A. (1990). *Learning strategies in second language acquisition*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- O'Malley, J. M. & Chamot, A. U. (1994). *The CALLA handbook: implementing the cognitive academic language learning approach*. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Company.
- Orrego, L. M. & Díaz, A. E. (2010). Empleo de estrategias de aprendizaje de lenguas extranjeras: inglés y francés. *Íkala*, 15(24), 105-142.
- Oxford, R. L. (1989). Use of language learning strategies: A synthesis of studies with implications for strategy training. *System*, 17(2), 235-247.
- Oxford, R. L. (1990). *Language learning strategies: What every teacher should know*. New York, NY: Newbury House.
- Oxford, R. L. (1996a). *Language learning strategies around the World: Cross-cultural perspectives*. Manoa, Honolulu: University of Hawaii Press.
- Oxford, R. L. (1996b). Employing a questionnaire to assess the use of language learning strategies. *Applied Language Learning*, 7, 25-45.
- Oxford, R. L. (2003). Language learning styles and strategies: An overview. *GALA*, 1-25.
- Park, G. P. (1997). Language learning strategies and English proficiency in Korean universities studies. *Foreign Language Annals*, 30(2), 211-221.
- Pressley, M. & Associates. (1990). *Cognitive strategy instruction that really improves children's academic performance*. Cambridge, MA: Brookline Books.
- Quarles, H. (1998). *Learning strategies preferred by older individuals*. PhD thesis. Bozeman, MT: Montana State University.
- Sadeghi, K. & Attar, M. T. (2013). The relationship between learning strategy use and starting age of learning EFL. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 70, 387-396.
- Sadeghi, K., & Khonbi, Z. A. (2012). Learners' starting age of learning EFL and use of language learning strategies. *English Language Teaching*, 6(1), 28-34.
- Salahshour, F., Sharifi, M. & Salahshour, N. (2013). The relationship between language learning strategy use, language proficiency level and learner gender. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 70, 634-643.
- Salem, N. (2006). *The role of motivation, gender, and language learning strategies in EFL proficiency*. Beirut, Lebanon: The American University of Beirut.
- Skehan, P. (1989). *Individual differences in second-language learning*. London, UK: Edward Arnold.
- White, S., Schramm, K. & Chamot, A.U. (2007). Research methods in strategy research: Re-examining the toolbox. In: A.D. Cohen and E. Macaro (Eds.). *Language learner strategies: Thirty years of practice*. Oxford, UK: Oxford University Press, pp. 93-116.
- Wu, I. J. (2011). *Learning strategies used by international students from Taiwan in a university context: A case study*. Master's thesis, California State University, US.
- Yang, M. N. (2007). Language learning strategies for junior college students in Taiwan: Investigating ethnicity and proficiency. *Asian EFL Journal*, 9(2), 63-70.

Zarei, A. & Baharestani, N. (2014). Language learning strategy use across proficiency levels. *i-manager's Journal of English on English Language teaching*, 4(4), 27-38.

Zimmerman, B. J. & Pons, M. M. (1986). Development of a structured interview for assessing student use of self-regulated learning strategies. *American Educational Research Journal*, 23, 614-628.



Aplicación del modelo de Christaller para la distribución espacial de supermercados



Iván F. Palacios Orejuela 

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente, Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción, Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE). Av. Gral. Rumiñahui s/n, Sangolquí, Ecuador.

Autor para correspondencia: ivan199632@hotmail.com

Fecha de recepción: 17 de septiembre de 2018 - Fecha de aceptación: 16 de noviembre de 2018

RESUMEN

La distribución en un territorio de centros de actividad económica, como supermercados, obedecen a un área de influencia que abarca una población definida. Esta distribución puede explicarse mediante modelos espaciales geográficos que analizan su ubicación e interrelaciones entre núcleos económicos. Uno de estos modelos es la Teoría de Lugares Centrales (CPT), propuesta por Christaller en 1933. En Ecuador, la principal empresa de servicio y comercialización de productos de primera necesidad es Corporación Favorita, la cual cuenta con supermercados Supermaxi y Megamaxi, ubicados en varias ciudades del país. Quito, Guayaquil y Cuenca, por su extensión e importancia para la economía del país, fueron las ciudades escogidas para este estudio. Mediante un SIG se aplicó la CPT con diferentes centros anidados de cobertura (rango 1, 2, 3, y 4), y se ajustó el modelo a la ubicación de los supermercados. En Cuenca y Guayaquil, el modelo explicó en forma correcta la distribución espacial de los supermercados, mientras que en Quito el modelo demostró, en gran medida, la espacialización en el norte y sur de la ciudad, sin embargo, en el centro norte y en los valles de la ciudad no representó adecuadamente la dinámica espacial. La geografía económica, a través de la CPT, explicó la distribución espacial de los supermercados, y presenta una herramienta técnica en la toma de decisiones para empresarios y al ordenamiento territorial de una ciudad.

Palabras clave: Modelos espaciales, Teoría de los Lugares Centrales, dinámica espacial, ordenamiento territorial, geografía económica.

ABSTRACT

The distribution in a territory of centers of economic activity, such as supermarkets, obey an area of influence that covers a defined population. This distribution can be explained by geographic spatial models that analyze their location and interrelations between economic cores. One of these models is the Central Place Theory (CPT), proposed by Christaller in 1933. In Ecuador, the main company of service and commercialization of products of first necessity is Corporación Favorita, which has Supermaxi and Megamaxi supermarkets located in several cities of the country. Quito, Guayaquil and Cuenca, for their extension and importance for the economy of the country were chosen for the study. Using a GIS, the CPT was applied with different coverage centers (range 1, 2, 3, and 4), and the model was adjusted to the location of the supermarkets. In Cuenca and Guayaquil, the model correctly explained the spatial distribution of the supermarkets, while in Quito the model demonstrated to a large extent the spatialization in the north, south of the city, however, in the northern center and in the valleys of the city did not represent the spatial dynamics. The economic geography, through the CPT explained the spatial distribution of supermarkets, and presents a technical tool in the decision making for businessmen and the territorial ordering of a city.

Keywords: Spatial models, Central Place Theory, spatial dynamics, territorial ordering, economic geography.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las más grandes empresas en el Ecuador (sino la más grande), en cuanto a servicios y comercio de alimentos y productos de primera necesidad, es Corporación Favorita C.A. Es una empresa ecuatoriana con más de 65 años en el país, cuya historia comenzó en el año de 1952 con la inauguración de la “Bodega La Favorita” en el centro histórico de Quito, por parte de su dueño fundador, el empresario Guillermo Wright (Corporación Favorita, 2018). Desde entonces, esta empresa ha crecido en todo aspecto, hasta convertirse en una de las empresas más importantes del país, a través de sus formatos de supermercados e hipermercados en casi todo el Ecuador, como son: Supermaxi, Megamaxi, Jugueton, Akí, Gran Akí, Super Akí y Super Saldos;

mismas que conforman las marcas propias de la empresa (Corporación Favorita, 2018).

Entre las marcas de La Favorita, se destacan sus supermercados Supermaxi y Megamaxi, los cuales se encuentran distribuidos en las principales ciudades del país como son: Ambato, Cuenca, Guayaquil, Ibarra, Latacunga, Loja, Machala, Manta, Portoviejo, Quito, Riobamba, Salinas y Santo Domingo (Corporación Favorita, 2018). Para abastecer la demanda de todo el país, la empresa cuenta con más de 6,000 proveedores, quienes entregan sus productos en el centro de distribución (CD) de La Favorita, ubicado en Amaguaña (cantón Rumiñahui, Pichincha) (González, 2017). El CD fue construido en el 2001 y es reconocido en América Latina por su tecnología de punta en todas las fases del proceso de recepción, distribución y elaboración de sus productos, además, de



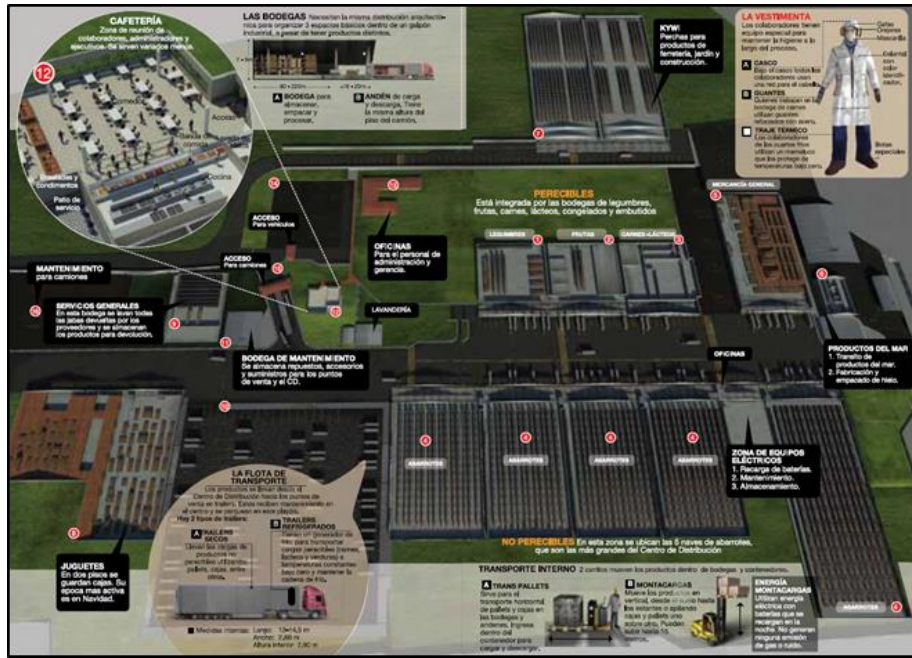


Figura 1. Centro de Distribución de Corporación Favorita (Fuente: González, 2017).

sus 165 mil metros cuadrados de infraestructura que albergan ocho bodegas (Fig. 1), de las que despachan diariamente, más de 205,000 bultos a todos los locales del país (González, 2017).

La distribución de los locales en el territorio, si bien es cierto, sigue un proceso de decisión gerencial y mercantilista, es posible también entender la lógica de su ubicación desde el punto de vista de la geografía, cuya rama de estudio es la geografía económica. Dentro de esta ciencia existen los denominados modelos espaciales, que combinan la economía espacial y la geografía, entre los que se destacan los modelos de Von Thünen (1876), Weber (1909), Christaller (1933), Lösch (1940), Isard (1956) y Krugman (1992) (Ramírez, 2001; Fujita & Krugman, 2004).

El entendimiento de la dinámica espacial en economía sirve no solo para satisfacer las necesidades de los clientes, sino también, como instrumento para un ordenamiento territorial en las ciudades donde existen este tipo de focos de acumulación y circulación de bienes y servicios, que entran y salen del territorio.

La Teoría de Lugares Centrales o CPT (como será abreviado en el presente trabajo), por sus siglas en inglés de Central Place Theory, es una herramienta utilizada para el análisis geográfico de las relaciones económicas (Sáenz, 2017).

El mentalizador de la CPT fue el geógrafo alemán Walter Christaller, quien planteó una organización jerárquica de ciudades, las cuales operan como lugares centrales que ofrecen bienes y servicios en un espacio isotrópico, es decir, homogéneo (Dennis, Marsland, & Cockett, 2002). La jerarquía de las ciudades está determinada por el umbral del lugar central. Se entiende por umbral, el radio a la redonda del lugar central que abarca la población mínima que una empresa requiere para alcanzar su punto de equilibrio en ventas (Garrocho, 2003). Los lugares centrales de mayor rango son entonces aquellos que tienen el mayor umbral, además de ser los únicos que ofrecen bienes de tipo superior (Sáenz, 2017). Según Asuad

(2014), este modelo requiere los siguientes supuestos básicos:

- La superficie es isotrópica, es decir uniforme;
- El desplazamiento ocurre en todas direcciones, sin barreras físicas al movimiento;
- Existe un solo tipo de transporte, y el costo de transporte está en función de la distancia;
- La población se distribuye a lo largo de la superficie en forma homogénea;
- Los consumidores y productores poseen racionalidad;
- La población tiene los mismos recursos;
- Las preferencias y demanda de los consumidores son homogéneas.

Al igual que el umbral, otro factor importante es el rango de mercado, correspondiente a la distancia máxima que los consumidores están dispuestos a recorrer para la adquisición de un bien o servicio. La relación entre el umbral y rango de mercado resulta en que el primero es menor o igual al segundo (Sáenz, 2017). Si se representa al rango y umbral como circunferencias se obtienen las áreas de mercado de la siguiente forma:

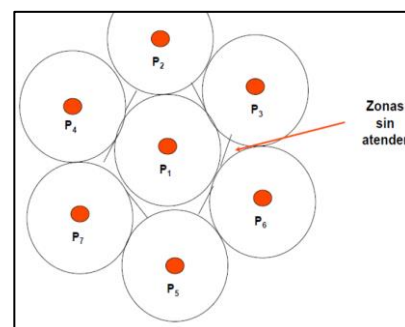


Figura 1: Estructura espacial de las áreas de mercado con círculos (Fuente: Asuad, 2014).

A pesar de cubrir, en gran parte, el área de influencia del mercado, existen ciertas zonas que no son atendidas (Fig. 2), por lo que Christaller propuso representar el umbral y rango mediante hexágonos, y así cubrir todas las áreas de influencia (Fig. 3). Una de las principales propiedades de la CPT es que, el sistema está conformado de una jerarquía espacial de centro (hexágono mediano) anidados a otros centros de bajo orden (hexágonos más pequeños), dentro de las áreas de orden mayor (hexágono más grande) (Clark & Rushton, 1970), esto se explica mejor en la Fig. 4.

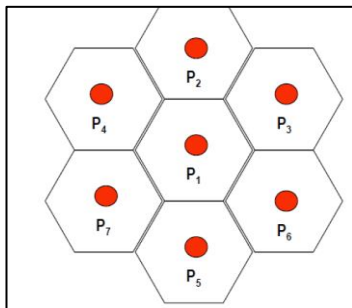


Figura 2. Configuración espacial de las áreas de mercado con hexágonos (Fuente: Asuad, 2014).

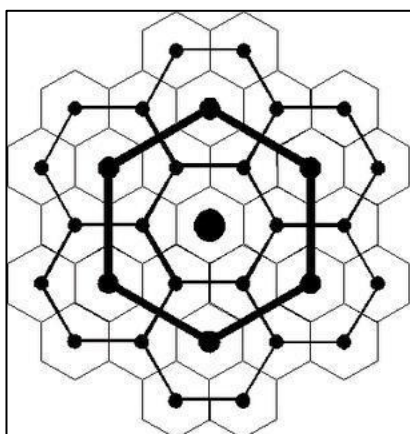


Figura 3: Jerarquización de las áreas de cobertura de los centros (Fuente: adaptado de Clark & Rushton, 1970).

El modelo de Christaller fue establecido de forma cualitativa (Asuad, 2014), sin embargo, algunos trabajos han realizado aproximaciones geométricas de la CPT (Sonis, 2005), semejante a las teorías de combinación poliédrica de Weyl (1935). Por su parte, Beckmann & McPherson (1970) propusieron una versión cuantitativa, que se muestra a continuación.

Cada ciudad (centro) de espacio j , posee una población P_j , que es una fracción constante c de ese espacio.

$$P_j = cP_j \quad (1)$$

donde: $0 < c < 1$, la jerarquía de las ciudades de ese espacio es tal que p_1 es la población de menor orden jerárquico y r la población rural dependiente de ella, por lo que la población del área servida por la ciudad de mayor rango, P_1 , es función de la población de menor rango p_1 y de r , denotado como:

$$P_1 = p_1 + r \quad (2)$$

Si la ecuación (2) se reemplaza en (1), la población de mayor rango es igual a la partición de esa ciudad en el espacio j , Cp_1 , agregada su población rural r , que es igual a la fracción de la población c por la población rural entre el total de la población de las ciudades, representada como $1-c$:

$$P_1 = Cp_1 \text{ y } P_1 = p_1 + r \quad (3)$$

$$P_1 = Cp_1 + r$$

$$P_1 = \frac{Cr}{1-c} \quad (4)$$

Por lo que, la población de la ciudad de orden 1 es igual al número de veces que represente la población de la ciudad de menor orden, incluyendo su población rural respecto a las ciudades en su conjunto de ese espacio. Además, las ciudades de una región, servidas por una ciudad de mayor orden (P_n), se obtienen de la población de menor orden P_{n-1} que controla $(1+s)$, donde s son los centros satélites de servicio y, al considerar que la población de la ciudad n , P_n permanece, y se tiene:

$$P_n = P_{n-1}(1+s) - P_{n-1} + P_n \quad (5)$$

Al incluir la constante c :

$$P_n = P_{n-1}(1+s) - cP_{n-1} + cP_n \quad (6)$$

$$P_n = P_{n-1}(1+s-c) + cP_n$$

$$P_n = \left(\frac{1+s-c}{1-c} \right) P_{n-1} \quad (7)$$

Debido a que en la CPT s y c son constantes a través de las jerarquías, se asume relación constante entre el tamaño de las ciudades de menor orden y de la población, con un comportamiento descendente.

$$P_n = \left(\frac{1+s-c}{1-c} \right)^{n-1} P_1 \quad (8)$$

Al sustituir el valor de p_1 y simplificar la expresión resulta:

$$P_1 = \frac{Cr}{1-c}$$

$$P_n = \left(\frac{1+s-c}{1-c} \right)^{n-1} P_1$$

$$P_n = \left(\frac{1+s-c}{1-c} \right)^{n-1} \frac{Cr}{1-c}$$

$$P_n = \left(\frac{1+s-c}{1-c} \right)^n \frac{rc}{1+s-c} \quad (9)$$

Esto indica que, si se conocen los asentamientos de la población rural r , se puede determinar el tamaño del área de mercado y la población de sus centros en cualquier orden.

La diferencia entre los modelos de la nueva geografía económica (NGE) y los modelos de la CPT, se debe a que estos últimos intentan una aproximación más realista y aplicable, a través de una amplia gama de actividades humanas relacionadas en sus análisis, bajo la mecánica de que estas actividades están incrustadas en el espacio (Mulligan & Carruther, 2012). Lo anterior hace posible que el modelo CPT tenga implicaciones prácticas de

política y planeación urbana (Sáenz, 2017). Sin embargo, también existen críticas al modelo propuesto por Christaller, principalmente en el supuesto de espacio estático, esto es, no contempla los cambios en el estatus socioeconómico de las personas (Lal & Kumar, 2011) y, además, no considera el papel que juegan los oligopolistas y las externalidades en los procesos de aglomeración (Martin & Sunley, 1996).

Dentro de sus aplicaciones, existen diversos trabajos que emplean este modelo para su explicación, por ejemplo: para explicar el acceso a espacios públicos (Smith & Floyd, 2013); en el entretenimiento de las funciones de ubicación y los resultados económicos derivados de alojar un evento deportivo (Daniels, 2007); en aproximaciones de microeconomía (Becerra, 2013); en el crecimiento de polos regionales (Parr, 1973; Rushton, 2010); en arqueología (Smith, 1979); y para la planeación de la ubicación espacial de centros comerciales (West, Von Hohenbalken, & Krone, 1985; Clark, 1982; Garrocho, 2003), entre otros.

Este último es el enfoque del presente estudio, el cual tuvo por objetivo aplicar la Teoría de Lugares Centrales de Christaller, para representar la distribución de los locales Supermaxi y Megmaxi en las ciudades de Quito, Guayaquil y Cuenca, con el fin de explicar la ubicación espacial de sus centros y subcentros de cobertura en dichas ciudades.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La información requerida para este estudio fue recogida del portal web de la empresa, en cuanto a la ubicación de los locales Supermaxi y Megamaxi en las tres ciudades analizadas, además de contar con la ubicación del CD de La Favorita. Para su especialización se utilizó un SIG, con el cual se realizó el modelo CPT con las áreas de influencia y sus respectivos rangos.

2.1. Descripción del área de estudio

El área de estudio comprendió las tres ciudades más importantes del Ecuador: Quito, Guayaquil, Cuenca, las cuales se encuentran ubicadas en los cantones que llevan sus mismos nombres (Fig. 5). La ciudad de Quito, capital ecuatoriana, cuenta con 2'239,191 habitantes (INEC, 2010) y es la capital política administrativa del país. Se encuentra ubicada sobre la hoya de Guayllabamba, en el lado oriental del volcán Pichincha; está subdividida en nueve administraciones zonales, que a su vez se fraccionan en 32 parroquias urbanas y 33 rurales y subrurales (DMQ, 2018). Se incluyó a la ciudad de Sangolquí, debido a la cercanía con Quito y a la presencia de dos locales de Supermaxi en su territorio.

“La perla del pacífico”, como se conoce a la ciudad de Guayaquil, es la capital económica del Ecuador, gracias a la presencia del Puerto de Guayaquil, el cual es el punto más importante de ingreso y salida del comercio en el país, con un 83% de todas las importaciones y el 70% del total de las exportaciones (Ecuavisa, 2016). Posee una población de 2'350,915 habitantes (INEC, 2010). Su división política comprende 16 parroquias urbanas y 5 rurales (GAD Guayaquil, 2018).

La ciudad de Cuenca, capital de la provincia de Azuay, se encuentra en la sierra sur del país y posee una población

de 505,585 habitantes, según las cifras oficiales del último censo poblacional (INEC, 2010). A esta ciudad se la considera como un foco de desarrollo muy importante para el Ecuador, por su organización territorial, política y económica, lo que ha llevado a convertirse en la sede de la Superintendencia de Ordenamiento Territorial (SOT), organismo encargado del ordenamiento territorial de país.

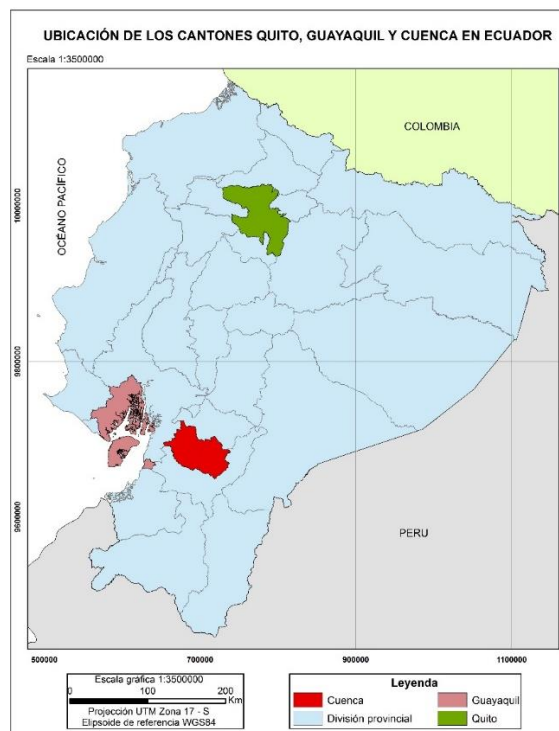
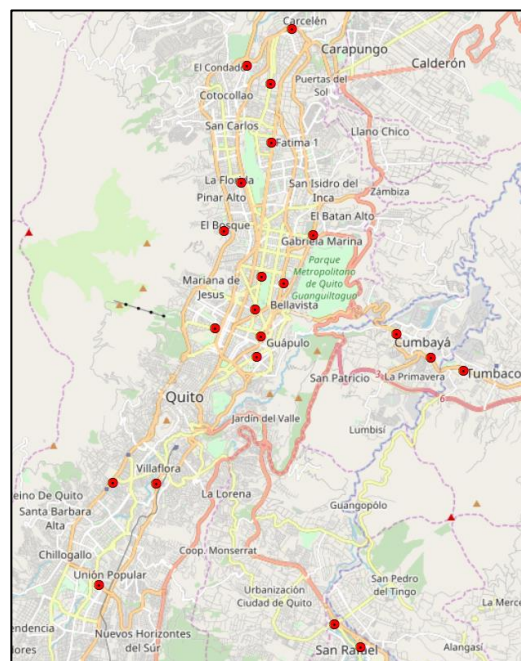
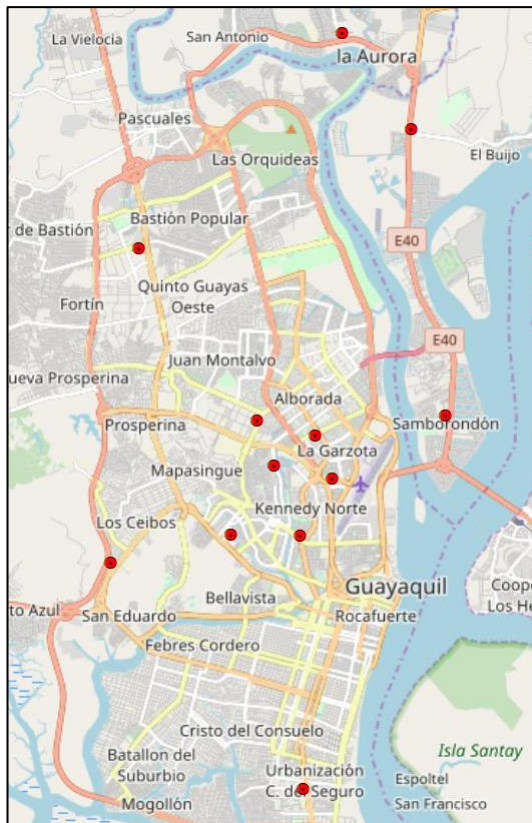


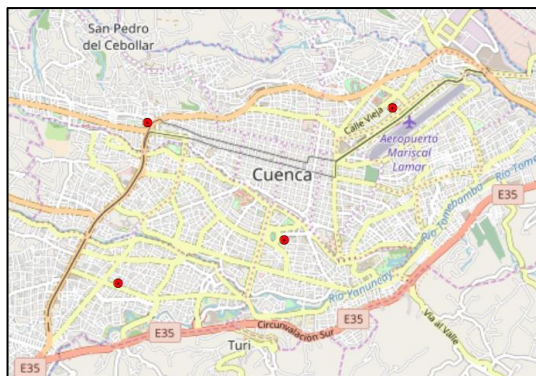
Figura 5. Mapa de ubicación de los cantones Quito, Guayaquil y Cuenca en el Ecuador.



(a)



(b)



(c)

Figura 6: Distribución espacial de los locales Supermaxi y Megamaxi en las ciudades de Quito (a), Guayaquil (b) y Cuenca (c).

2.2. Distribución espacial

Como se mencionó anteriormente, el entendimiento de la ubicación espacial de los locales Supermaxi y Megamaxi, en este caso de estudio, permite analizar sus interacciones, su área en la cobertura de servicios y contribuir a la toma de decisiones para el ordenamiento territorial de una ciudad. En la Figura 6, se aprecia la ubicación de los distintos locales Supermaxi y Megamaxi en las ciudades bajo estudio.

A continuación, mediante herramientas SIG, se procedió a realizar el modelo de la CPT. Se usó el software ArcGis 10.2 para la generación de los hexágonos en las tres ciudades (Fig. 7). Se aplicaron cuatro valores para definir el rango de mercado, los cuales fueron jerarquizados de la siguiente manera: hexágono de rango 4 (27.8 km).

hexágono de rango 3 (9.3 km), hexágono de rango 2 (4.5 km) y hexágono de rango 1 (3 km), según el criterio cualitativo del modelo. Estos valores fueron establecidos mediante la experimentación y optimización de las áreas de influencia en las ciudades bajo estudio, para garantizar una cobertura total del servicio según las categorías asignadas.

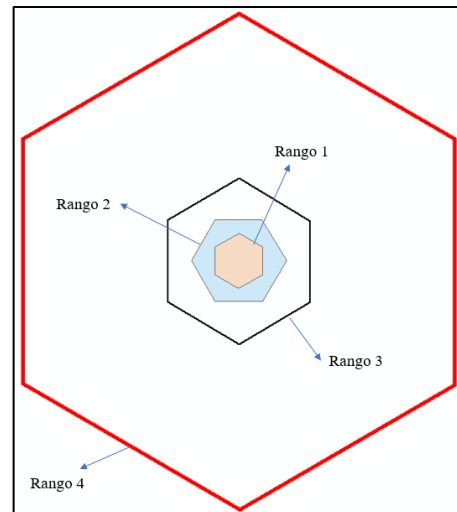


Figura 7: Construcción de los hexágonos según la jerarquía del área de influencia.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Una vez aplicado el modelo de Christaller a la distribución espacial de los supermercados Megamaxi y Supermaxi en las tres ciudades, se tuvo como resultado lo mostrado en las Figuras 8, 9, 10:

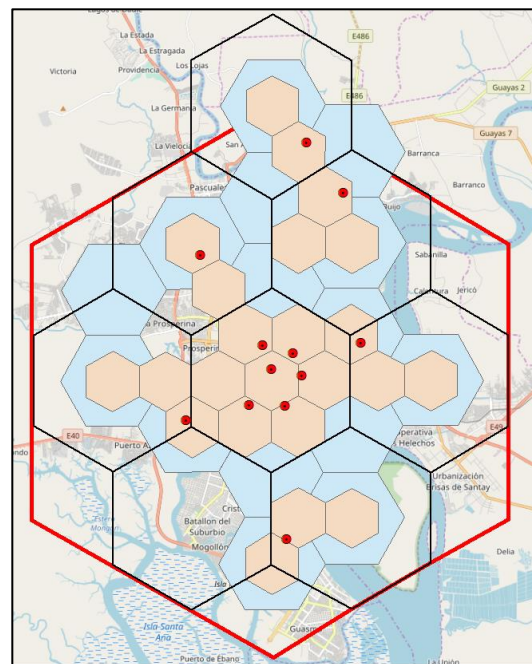


Figura 8: Modelo de Christaller para la ciudad de Guayaquil.

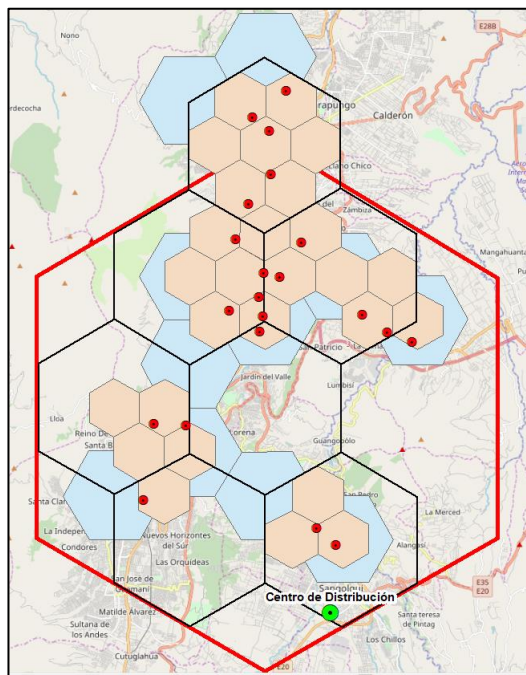


Figura 9: Modelo de Christaller para la ciudad de Quito.

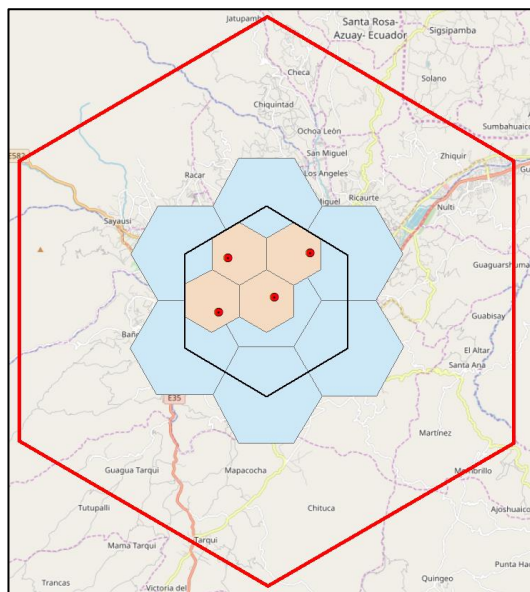


Figura 10: Modelo de Christaller para la ciudad de Cuenca.

En el caso de la ciudad de Guayaquil, la CPT se ajusta de manera coherente con la distribución espacial en la que se encuentran ubicados los locales Supermaxi y Megamaxi en dicha ciudad, lo que garantiza un área de cobertura bien aprovechada y, además, sin competencia entre estos. Se puede observar de mejor manera el ajuste del modelo en la parte céntrica de la urbe, debido a la correspondencia de un único local por hexágono de rango 1 (ver Fig. 11). También se puede apreciar que, al menos hay un supermercado en cada hexágono de rango 3 (ver Fig. 8).

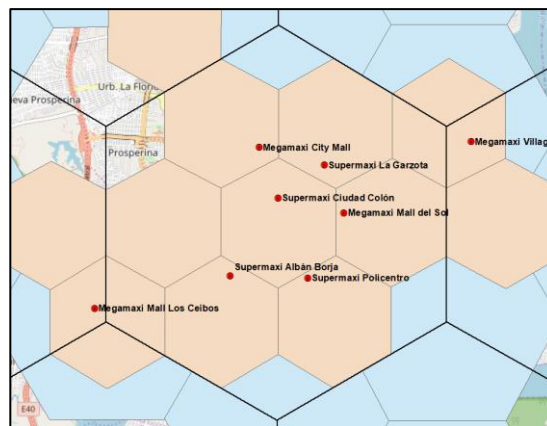
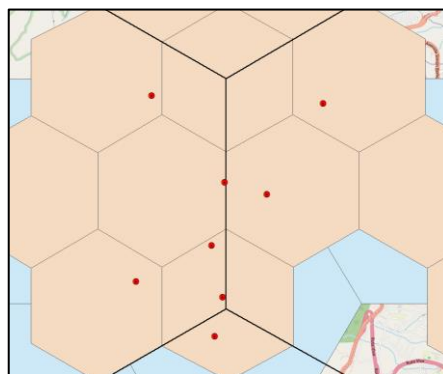
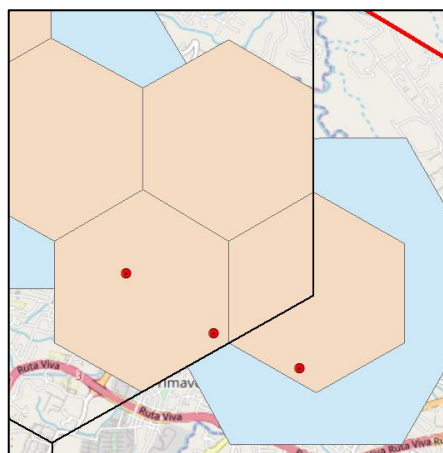


Figura 11: Distribución apropiada de locales según el modelo de Christaller en Guayaquil.

En la ciudad de Quito, se obtuvo un buen modelo de distribución espacial en las zonas norte y sur de la ciudad, así como en Sangolquí, mientras que, en el centro norte y valles de la capital (Cumbayá y Tumbaco), la CPT no se ajustó a la ubicación de los locales Supermaxi y Megamaxi (Fig. 12), lo cual sugiere dos posibles razones:



(a)



(b)

Figura 12: Mala distribución de los locales según el modelo de Christaller en la zona centro norte (a) y valles (b) de Quito.

(i) una mala distribución geográfica de los locales en la ciudad, o (ii) el modelo de Christaller no explica el comportamiento de la distribución en esta zona. Sin embargo, esto último sería menos probable, ya que el modelo explica favorablemente la especialización en el resto de la ciudad. También es importante notar que el hexágono de rango 4 (área total de cobertura), no engloba a todos los locales de la ciudad, esto significa que el modelo no se ajusta completamente a su distribución del área de cobertura.

Finalmente, para la ciudad de Cuenca, el modelo de Christaller se ajusta de forma excelente para explicar la distribución de los supermercados en la ciudad, como se demuestra en la Figura 10, sin competir entre ellos y con una cobertura total de la ciudad.

4. CONCLUSIONES

La Teoría de Lugares Centrales de Christaller demostró en casi todos los casos, que la distribución espacial de los locales Supermaxi y Megamaxi, se ajustan de forma correcta al modelo de hexágonos propuesto por Christaller, por lo que, gracias a la geografía económica, es factible un análisis técnico para comprender y mejorar la ubicación en el territorio de este tipo de negocios.

El modelo de Christaller, es una herramienta que ayuda no solo al entendimiento de la dinámica de la economía espacial, sino también a la toma de decisiones, por parte de los gerentes o dueños de las empresas, para la ubicación de nuevos supermercados, y para el mejoramiento del ordenamiento territorial de una ciudad.

A través del uso de la CPT, se determinó que las ciudades de Guayaquil y Cuenca se ajustan correctamente al modelo propuesto; por su parte, en Quito, la CPT no explicó totalmente el comportamiento de la distribución espacial en sus locales, sobre todo para la parte centro norte y valles de la ciudad.

A pesar de los resultados, que en su mayoría fueron satisfactorios, se observó ciertas limitaciones del modelo, en cuanto al nivel de detalle que permite conocer la cobertura de las áreas de servicio a escalas más grandes (por barrio o manzana), además de la falta de información respecto a la ubicación exacta de los proveedores dentro de cada hexágono, con lo cual se podrían definir de mejor forma los rangos de cobertura en cada hexágono y así obtener un ajuste completo del modelo sin dejar por fuera a ciertos locales, como fue el caso de Quito.

El presente estudio entrega una propuesta técnica para la explicación de la geografía económica en cuanto a la distribución, ubicación e interrelación de una red de supermercados, como son Supermaxi y Megamaxi en las ciudades analizadas, que podría ayudar, a diversas escalas, en posteriores trabajos relacionados a la temática expuesta.

REFERENCIAS

Asuad, N. (2014). *Teorías de la distribución espacial de las actividades económicas*. México D.F., México: UNAM.

Becerra, L. (2013). Aproximaciones microeconómicas en la teoría de los lugares centrales de Christaller. *Ensayos sobre Política Económica*, 31(70), 68-120.

Beckmann, M. J., & McPherson, J. C. (1970). City size distribution in the Central Place Hierarchy: an alternative approach. *Journal of Regional Science*, 10(1), 243-248.

Clark, D. (1982). *Urban geography*. Londres, Inglaterra: Croom Helm.

Clark, W., & Rushton, G. (1970). Models of intra-urban consumer behavior and their implications for central place theory. *Economic Geography*, 46(3), 486-497.

Corporación Favorita. (2018). *Área Comercial*. Disponible en <http://www.corporacionfavorita.com/marcas/>

Corporación Favorita. (2018). *Hitos Corporación Favorita*. Disponible en <http://www.corporacionfavorita.com/hitos-corporacion-favorita/>

Corporación Favorita. (2018). *Mapa de locales*. Disponible en <http://www.supermaxi.com/locales/>

Daniels, M. (2007). Central place theory and sport tourism impacts. *Annals of Tourism Research*, 34(2), 332-347.

Dennis, C., Marsland, D., & Cockett, T. (2002). Central place practice: shopping centre attractiveness measures, hinterland boundaries and the UK retail hierarchy. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 9, 185-199.

DMQ, Distrito Metropolitano de Quito. (2018). *Secretaría de territorio, hábitat y vivienda*. Disponible en <http://www.quito.gob.ec/index.php/quito-por-temas/territorio-habitat-y-vivienda>

Ecuavisa. (2016). *Guayaquil, capital comercial del Ecuador*. Disponible en <http://www.ecuavisa.com/articulo/guayaquil-mi-destino/189746-guayaquil-capital-comercial-del-ecuador>

Fujita, M., & Krugman, P. (2004). La nueva geografía económica: pasado, presente y futuro. *Investigaciones Regionales*, 4, 177-206.

GAD Guayaquil. (2018). *División política*. Disponible en <http://www.guayaquil.gob.ec/divisi%C3%B3n>

Garrocho, C. (2003). La teoría de interacción espacial como síntesis de las teorías de localización de actividades comerciales y de servicios. *Economía, Sociedad y Territorio*, 4(14), 203-251.

González, S. (2017). Centro de distribución: mini ciudad inteligente. *Revista Ekos*, 38-41.

INEC. (2010). *Resultados censo de población 2010*. Disponible en <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>

Lal, M., & Kumar, V. (2011). Assumptions of central place theory and gravity models with special reference to consumer spatial behaviour. *Journal of Management & Public Policy*, 2(2), 99-108.

Martin, R., & Sunley, P. (1996). Paul Krugman's geographical economics and its implications for regional development theory: A critical assessment. *Economic Geography*, 72(3), 259-292.

- Mulligan, G., & Carruther, J. (2012). Central place theory and its reemergence in regional science. *Springer-Verlag*, 48, 405-443.
- Parr, J. (1973). Growth poles, regional development, and central place theory. *Papers of the Regional Science Association*, 31, 173-212.
- Ramírez, B. (2001). Krugman y el regreso a los modelos espaciales: ¿La nueva geografía?. *Terra Livre*, 16, 25-38.
- Rushton, G. (2010). Postulates of Central-Place Theory and the Properties of Central-Place Systems. *Geographical Analysis*, 3(2), 140-156. doi:10.1111/j.1538-4632.1971.tb00358.x
- Sáenz, J. A. (2017). *Regiones funcionales en los municipios del norte del departamento del Magdalena Colombia: un enfoque desde el modelo clásico de Christaller*. Barranquilla, Colombia: Tesis de maestría, Universidad del Norte.
- Smith, M. (1979). The Aztec marketing system and settlement pattern in the valley of Mexico: A central place analysis. *American Antiquity*, 44(1), 110-125.
- Smith, J., & Floyd, M. (2013). The urban growth machine, central place theory and access to open space. *City, Culture and Society*, 4, 87-98.
- Sonis, M. (2005). Central place theory after Christaller and Lösch & some further explorations. *Israel Prepared for the presentation at 45th Congress of the Regional Science Association*, 23-27.
- West, D., Von Hohenbalken, B., & Krone, K. (1985). Test of intraurban central place theories. *The Economic Journal*, 95, 101-117.



La Estrategia del Océano Azul y su relación con el Negocio Inclusivo del reciclaje en la ciudad de Cuenca, Ecuador



Gabriela López. A^{1,2} , **Lourdes S. Carvalho^{1,3}** , **José S. Jimbo^{1,4}**

Universidad de Cuenca, Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas, Cuenca, Ecuador.

Autor para correspondencia: gabriela.lopez30@ucuenca.ec

Fecha de recepción: 31 de agosto de 2018 - Fecha de aceptación: 17 de noviembre de 2018

RESUMEN

El presente artículo aborda la evolución de dos teorías como la Estrategia del Océano Azul (EOA) que inicia en el 2005 y manifiesta que el sector empresarial no debería enfocarse en la competencia destructiva, sino ampliar sus horizontes de mercado mediante la innovación; seguido del análisis de la Base de la Pirámide Económica (BDP) que nace en el 2002, brindando la oportunidad de inclusión social a la población con menores ingresos, dando inicio a la introducción del Negocio Inclusivo (NI) en el año 2005. Actualmente, estas dos teorías se manejan en el ámbito empresarial, pero no existe una articulación de las mismas, provocando que no se pueda identificar una similitud o diferencia, el artículo encontró varios elementos que permiten reconocer la relación entre la EOA y el NI del reciclaje tomando como punto de referencia la ciudad de Cuenca. La metodología utilizada fue un análisis cualitativo mediante revisión literaria con clasificación exhaustiva para un entendimiento global del contenido. La investigación arroja elementos comunes identificados en la EOA y los NI, concluyendo en el reconocimiento de una relación existente, considerando que el NI es una EOA permitiendo ser aplicable en varias industrias.

Palabras clave: Estrategia, negocio inclusivo, emprendimiento, innovación, pobreza.

ABSTRACT

This article presents the evolution of two theories: Blue Ocean Strategy (BOS) that begins in 2005 and shows that the corporate sector should not focus in a destructive competition, but extend its market horizons, through the innovation; followed by an Economic Base Pyramid analysis (EBP) that begins in 2002, giving a social inclusion opportunity for low income population, starting with the introduction of an Inclusion Business (IB) in the year 2005. Currently, these two theories work in a corporate sector but there is not any articulation for them; for this reason, we are not able to identify similarities or differences. The article finds many elements that allow us to recognize the relationship between BOS and IB of recycling business, taking the city of Cuenca as a benchmark. The methodology used was a qualitative analysis through a literary review with a comprehensive classification to get a global understanding of this content. This research gives common elements identified in BOS and IB, and we concluded that there exists a relationship between them; considering that IB is a BOS it can be applied in many industries.

Keywords: Strategy, inclusive business, entrepreneurship, innovation, poverty.

1. INTRODUCCIÓN

La aplicación de la EOA permite lanzar productos y servicios de calidad, consiguiendo la aceptación de los consumidores y poder explorar nuevos nichos de mercado (Kim & Mauborgne, 2005). Esta estrategia no solamente puede ser implementada por grandes empresas sino por nuevos emprendimientos inclusivos (Mendoza, 2013). El NI nace con la teoría de la fortuna en la BDP creada por Prahalad & Hammond (2005) donde establecen que las personas pertenecientes a este sector pueden formar parte de los procesos productivos de las empresas, logrando obtener beneficios para ambas partes y el desarrollo social.

Actualmente, estas dos teorías se manejan en el ámbito empresarial, pero hasta el momento no se ha realizado un análisis académico-científico que demuestre la relación entre ellas, por lo que se aprovechó la oportunidad de realizar un artículo para determinar su similitud mediante la elaboración de un cuadro con elementos comunes, características de la EOA y su respectiva aplicación de NI

en la ciudad de Cuenca, Ecuador, enfocado al trabajo realizado por recicladores de residuos sólidos potencialmente reciclables como son el papel, cartón, plástico y metal. Esta EOA denominada NI es un gran desafío para ser tomado en la industria del reciclaje por generar un cambio sistémico en cuatro ámbitos como son: la condición económica de los recicladores, políticas públicas incluyentes, fabricar productos promoviendo el cuidado ambiental y, en el sector privado, agregando a los recicladores en su Cadena de Valor (CDV) (AVINA, 2015).

2. METODOLOGÍA

El diseño metodológico utilizado fue un análisis de investigación cualitativa mediante el estado del arte que consistió en la búsqueda, clasificación y selección de información documental en artículos científicos que



pertenecen a revistas y libros relacionados a la EOA y el NI, considerando una logística de búsqueda por medio de diferentes bases de datos como Scopus, Latindex y Google Académico, introduciendo palabras claves como: Negocio Inclusivo, Estrategia del Océano Azul, emprendimiento, base de la pirámide económica, liderazgo e innovación de valor.

Para la selección de los artículos, se priorizó dos aspectos: 1) que hayan sido publicados en revistas científicas indexadas en inglés o español y 2) se tomó como preferencia estudios realizados en países con un sistema económico en vías de desarrollo, debido a la falta de publicaciones en países industrializados por la diferencia del contexto cultural con enfoque en la innovación. Se encontraron 90 artículos que cumplen con los criterios antes mencionados. Para el análisis e interpretación de la información en las investigaciones consultadas se diseñó un esquema con datos relacionados a la fecha de publicación, objetivos, ubicación, metodología, hallazgos y conclusiones.

3. REVISION DE LITERATURA

3.1. Estrategia del Océano Azul

Origen del Concepto de la Estrategia del Océano Azul

La EOA fue desarrollada por Kim & Mauborgne (2005), quienes la definen como una herramienta analítica, conceptual e innovadora cuyo objetivo es abordar la competencia desde una nueva visión que desafíe el tradicional enfoque de imitar y superar lo que hacen los competidores, al cual lo denominan océano rojo, para enfocarse en la propia empresa como único competidor, permitiendo la generación de nuevos mercados que aporten al crecimiento de las empresas, entendiéndose a esta forma de actuar como océano azul, requiriéndose que la organización desarrolle elementos como: la innovación de valor, liderazgo y diferenciación a bajo costo.

Kim & Mauborgne (2005) indican que a la innovación de valor se la puede entender como la piedra angular de la EOA, Orlov & Chubarkina (2017) coinciden con este criterio y determinan que la innovación de valor es un elemento que considera a todas las actividades de una empresa que conllevan al crecimiento de la misma, el cual según Gómez & Garrido (2011), Leavy (2018), Monteiro *et al.* (2017) y Pulgarín & Rivera (2012) se logra a través de la innovación del modelo de negocios de la empresa, con base a la diferenciación del producto o servicio, en el que además debe existir un alineamiento entre el precio, costo y utilidad.

Por otra parte, Díaz (2014) y Stivale & González (2012) priorizan que la innovación es un factor que acorta el ciclo de vida de los productos, estableciendo que las empresas deben enfocarse más en la demanda que en la oferta, basándose en elementos como diseño, operaciones y cliente, evidenciando la relación directa que existe entre la innovación, las expectativas del cliente con respecto al precio y a la preocupación que tienen las personas por el medio ambiente.

Por lo anteriormente mencionado Latorre, Díaz, Plata, & Marín (2015) y Zarate & Gutiérrez (2013) establecen que la innovación de valor debe considerar también a la Responsabilidad Social Empresarial (RSE) y la inclusión social, desde este punto de vista, Che Tu, Chieh Shih, Ying

Hsu, & Hao Lin (2014) describen que las personas que se encuentran en la BDP, son consideradas como fuente de innovación, debido a que crean productos relacionados con aspectos medioambientales, en este sentido, se evidencia que esta forma de innovar es aplicada por muchas empresas a nivel mundial, con mayor incidencia en Latinoamérica, debido a que se enfrentan a grandes desafíos para fomentar crecimiento económico (Avila, Solís, Zayas, & Galván, 2018), permitiéndoles involucrarse en una nueva ruta estratégica, a la cual Rodríguez & Antolinez (2015) y Wee (2017) la definen como mercados no explotados o nuevos modelos y a los que se los denomina además como océanos azules.

Con respecto al liderazgo, Buengele, Leroyb, & De Stobbeleir (2018) y Lupano, Benatuil, & Nader (2007) lo definen como un proceso en el que una persona denominada líder logra, por medio de la comunicación, tener cierta influencia sobre los miembros de la empresa, con el fin de alcanzar metas y objetivos comunes, Sierra, Ortiz, Rangel, & Alvarado (2010) identifican dos tipos de liderazgos como son: el liderazgo transformacional que determina a los líderes de las empresas como influyentes sobre los miembros de la misma y viceversa; y el liderazgo situacional, estableciendo que los líderes deben ser flexibles a los cambios y desarrollo de los miembros de la organización, lo que les convierte en emprendedores e innovadores.

En este contexto Borges & Montero (2013) indican que, aparte del concepto y las diferentes clasificaciones de liderazgo, es imperativo el desarrollo de cuatro beneficios para el mercado en el que participan las empresas: generación de nuevos productos, brindar servicios de calidad a los clientes, reducción de los costos y una mejora en los canales de distribución. Todo esto con el propósito de prolongar el tiempo de sus productos en el mercado y generar más ingresos, por medio de cuatro enfoques descritos por Kim & Mauborgne (2014) como son: (i) enfoques en hechos y actividades para el logro de objetivos, (ii) vincular el liderazgo a las situaciones del mercado, (iii) distribuir liderazgo a todas las áreas de la empresa y (iv) búsqueda de actividades con alto impacto y bajo costo.

Este cuarto enfoque se encamina hacia la definición de diferenciación y bajo costo, Kim & Mauborgne (2005) y Lillo, Ramón, & Sevilla (2007) la conceptualizan como la capacidad que tienen las empresas para brindar a sus consumidores un producto innovador tanto en calidad como en sus atributos, mediante costos bajos, los cuales, según Kesavayuth, Lee, & Zikos (2017) y Sharma (2016), se logran mediante un trabajo exhaustivo en el modelo de negocios de la empresa, a través de incurrir en bajos costos de producción, obteniendo como resultado un precio accesible para los consumidores con la finalidad de que satisfagan sus necesidades, esto se ve reflejado en un incremento de la demanda de los productos o servicios que ofertan las empresas y posteriormente en un aumento de sus utilidades.

Sin embargo, Zúñiga (2012) es crítico con la posibilidad de la creación de productos o servicios a bajo costo y, más bien, opina que los mismos, al ser altamente diferenciados, tendrán un alto costo, por lo tanto, define que las empresas deben pensar en la implementación de la EOA de forma coherente con la dinámica del mercado y reconocer que la diferenciación es creada en la CDV de las empresas, mediante el valor que genere cada una de ellas (Benítez, 2012).

A partir de la diferenciación, las empresas logran el liderazgo en costos por medio de un precio más competitivo y cuando la competencia desaparece. Correia, Barbosa, & Epaminondas (2015) concluyen que esta teoría contradice uno de los fundamentos estratégicos que determina que las empresas siempre tienen que escoger entre la posibilidad de agregar valor a un producto, a través de cobrar un precio mayor al habitual o brindar productos menos diferenciados a un precio más bajo. Sin embargo, Carrillo, Cristancho, & Silva (2015) describen que para lograr diferenciación los líderes de las empresas deben dejar de lado la competencia y enfocarse en la competitividad, por lo que es necesario diferenciar estos términos. Martínez & Carmona (2009) definen a la competencia como la disputa entre dos o más empresas establecidas en un mismo mercado, que ofrecen el mismo producto o servicio y tienen como objetivo superar a sus rivales; Bernal, Fracica, & Frost (2012) definen a la competitividad como la capacidad que tienen las empresas de producir bienes o servicios de calidad para un mercado determinado, logrando mayor preferencia por los consumidores.

Por lo tanto, Chirinos (2011), Orlov & Chubarkina (2017) y Vargas, Muñoz, & Santoyo (2015) establecen que los elementos mencionados anteriormente se enfocan en crear y captar nueva demanda, introduciéndose en un océano azul que está constituido por un nicho de mercado aún no explorado. En base a esto, Kamal & Dionne (2015) establecen que en este punto las empresas tratan de atraer a un nuevo grupo de clientes a los que se les denomina los no clientes, con el objetivo de que la competencia pierda sentido, sin embargo, Agnihotr (2016) contradice este criterio, priorizando que existe la posibilidad de que una parte de los no clientes identificados no accedan al nicho de mercado esperado, debido a que no tienen convicción de lo que la empresa ofrece, razón por la cual es imprescindible que las mismas implementen los tres elementos de la EOA de manera adecuada, basándose en las necesidades de cada segmento de mercado, captando de este modo una nueva demanda y generando utilidades para el crecimiento de las empresas.

Evolución operativa de la Estrategia del Océano Azul

Cervilla & Puente (2010) priorizan el entendimiento a profundidad de la metodología para implementar la EOA y sugieren el establecimiento de ocho preguntas que respondan aspectos como el mercado, la empresa, los consumidores, océanos azules, fronteras de mercados, oferta, fronteras del nuevo mercado y la ejecución de la EOA, convirtiéndose en puntos claves para obtener resultados positivos en las empresas.

Además, Pineda (2009) establece al mapa estratégico como una herramienta importante para reconstruir fronteras de mercados, convirtiéndose en una gran oportunidad para las empresas pequeñas. Lohtande, Aholainen, Volotinen, Peltokoski, & Ratava (2017) y Mendoza (2013) precisan que esta estrategia es aplicable tanto para empresas que se encuentran establecidas en el mercado como para nuevos emprendimientos que parten desde cero. Por otra parte, Puente & Auletta (2009) coinciden con este criterio, sin embargo ratifican que cuando se habla sobre posicionamiento de mercado, Kim & Mauborgne (2005) al plantear la EOA solo citan ejemplos de grandes empresas, las mismas que se ven amenazadas por el ingreso de pequeñas o nuevas empresas, en este sentido Kim & Mauborgne (2009)

aportan que es necesario implementar una estrategia que defina el entorno de las empresas en lugar de dejar que el entorno defina la estrategia.

Al mismo tiempo, Barreda (2013), Becker (2006) y Wee (2017) concluyen que existen dos limitaciones de esta estrategia: 1) en lo referente a la creación de los océanos azules, estos autores afirman que los competidores siempre tratarán de imitar sus estrategias y, en algunos casos, lograrán superarlos, y 2) conocer si ha sido implementada con eficiencia y eficacia, para lo cual dichos autores sugieren un seguimiento luego de haber implementado la EOA, determinando al Cuadro de Mando Integral como la herramienta adecuada para conocer los resultados, la misma que debe considerar a una parte importante de la empresa que son los clientes y su fidelización que se evidencia el crecimiento de las empresas. Por otro lado, Lohtande *et al.* (2017) y Valencia (2008), en cambio, sugieren que una parte importante para el crecimiento empresarial es atribuible a la experiencia que poseen los empleados y a la forma en que logran llegar hacia los consumidores, convirtiéndose en un factor importante de innovación constante que permite reducir los costos mediante la eficiencia en los procesos, provocando una espiral de productividad que da como resultado una eficiencia en costos, que es complejo de imitar para los competidores, debido a que se convierte en un desafío para las empresas.

En este sentido, Kim & Mauborgne (2005) y Salamanca, Uribe, & Mendoza (2017) mencionan que para medir la eficacia y eficiencia de esta estrategia es necesario poseer tres cualidades como: (i) foco, en el que se refleje el perfil estratégico o la curva de valor de la empresa, para enfocarse en las variables que aporten mayor valor, (ii) Divergencia, con una curva estratégica diferente, se muestran variables que no se han considerado hasta el momento y (iii) mensaje contundente.

A partir de las cualidades obtenidas en la EOA, autores como Wengel, Ferreira, Pérez, & Suárez (2010) han investigado casos de empresas para conocer lo que sucede luego de implementar la EOA, concluyendo que los océanos azules, siendo nuevos mercados, no duran para siempre dado que las empresas se fundamentan en una idea y con un objetivo que luego de cumplirlos son olvidados y se convierten en obsoletos en algunos casos debido a que los líderes de las empresas no saben mantener el ritmo de la innovación. Kesavayuth *et al.* (2017) contradicen este criterio estableciendo que las competencias no se desgastan ni desaparecen con el tiempo, sino al contrario, se fortalecen, obteniendo como resultado un alto posicionamiento en el mercado y es muy difícil que estas empresas tengan competidores.

Luego de conceptualizar a la EOA, describir cada uno de los elementos y estructurar la forma operativa de la aplicación de esta estrategia, es necesario mencionar que la misma abarca diferentes industrias, sin especificar una en particular. En primera instancia, uno de los casos más conocidos es el Cirque du Soleil, además de la empresa de turismo conocida como Fundación de Ciudades Medias de Andalucía (CMA), analizada por Torres, García, & Pulido (2013). En ambos casos se observó que el crecimiento de las empresas ha disminuido con el paso del tiempo, por tal motivo optaron por la implementación de estrategias innovadoras que aporte su crecimiento. Vini Cosmetics es una empresa de la India que no tuvo gran acogida en el mercado, por lo cual su gerente decidió comprender las necesidades de las personas y, desde ese punto, innovar en

sus marcas, convirtiéndose en la empresa pionera en la construcción de marcas con base en varios segmentos de mercado (Sharma, 2016), todos los casos mencionados implementaron la EOA basándose en la innovación, logrando diferenciación, crecimiento y liderazgo en el mercado, obteniendo resultados a largo plazo y manteniendo todo lo que han logrado.

3.2 *Negocios inclusivos*

Los negocios inclusivos y la base de la pirámide económica

El origen del NI se sustenta en la teoría de “La Fortuna en la Base de la Pirámide” desarrollada por Prahalad & Hart (2002), exponen que la pirámide económica se puede dividir en niveles de acuerdo a los ingresos anuales per cápita y determinan que en la BDP se encuentran alrededor de 4.000 millones de personas llamadas pobres, denominación otorgada en función a los ingresos económicos, es decir, con ingresos inferiores a USD\$ 1,500 anuales y menos de USD\$ 3 al día, por lo que se cumple al decir que una persona es pobre porque sus ingresos no cubren totalmente sus necesidades básicas (Marquéz, 2007).

En términos generales, la comunidad que se encuentra en la BDP refleja una ventaja para las empresas por ser un nicho de mercado por atender, ofreciéndoles productos o servicios que estén dentro de sus posibilidades económicas, con base en esta iniciativa y agregándole el término de inclusión, las personas que conforman la BDP también pueden ser vistas como proveedores o socios estratégicos, formando parte de la CDV de las empresas. De esta forma nace el término de NI con el objetivo de obtener un beneficio para el sector vulnerable como es combatir la pobreza y mejorar su calidad de vida, devolviéndoles la dignidad humana que es un derecho que posee cada persona y, por el lado de las empresas, innovar sus procesos productivos usuales o reducir sus costos (Hahn, 2012; Jones, 2016; Prahalad & Hammond, 2005).

Para Licandro & Pardo (2013), Peerally, De Fuentes, & Figueiredo (2018) y Vidal (2008) los NI resultan ser una estrategia con cuatro elementos importantes; organización en emprendimientos productivos, integración de las comunidades locales en el desarrollo de habilidades, redes comerciales y sociales, disponer de herramientas necesarias para su evolución en conjunto con las empresas privadas y gubernamentales a través de diversas actividades innovadoras y obtener de manera directa una mejora en la calidad de vida de la BDP.

Desde el punto de vista de Márquez, Reficco, & Berger (2009) la creación del NI requiere de innovación paciente, pues la misma es considerada una inversión a largo plazo, sin embargo, este tipo de negocio tiene una característica que hace muy notorio el adjetivo de inclusivo y es la gran posibilidad de que las personas, mediante el trabajo asignado, se acerquen a las condiciones de vida que aspiran. En consecuencia, cabe la necesidad de enfocarse en la diferencia que existe entre el objetivo de los NI y la RSE. Según menciona Sabogal (2008), la RSE comienza a partir del siglo XIX con asistencia social, obras de caridad realizadas por la iglesia y financiadas a través de donaciones privadas y a requerimientos de orden fundamentalmente ético o religioso.

En la medida que el proceso de conceptualización de NI avanza, Ezequiel (2010) cuestiona la distancia que quiere marcar Prahalad & Hammond (2005) entre NI y RSE al

inicio de su teoría publicada en el 2002 como la fortuna en la base de la pirámide, indica la escasa relación de filantropía e ideas de RSE y, en otro apartado, observa que las empresas multinacionales típicamente se relacionan con la pobreza solo mediante RSE.

Bruni & González (2010) consideran a la filantropía como la ayuda brindada a una persona con escasos recursos económicos, pero sin priorizar procesos de transformación en las comunidades para combatir la pobreza. En definitiva, Sosa (2014) y Virah-Sawmy (2015) concluyen que el objetivo de la RSE es conseguir un triple resultado al trabajar con el ámbito social, ambiental y económico, y, en consecuencia, a los comportamientos erróneos que tiene la empresa con sus colaboradores y la mayoría de acciones relacionadas a la RSE. Bustamante & Muñoz (2017) determinan una serie de limitantes como podría ser la desconfianza de los actores locales y comunidades con las instituciones, la desmotivación o la búsqueda de intereses individuales y no un beneficio común.

Es importante contemplar todos los aspectos necesarios para la inclusión, principalmente crear un ambiente de confianza entre la BDP y la empresa, sus propuestas para trabajar con sectores vulnerables necesitan recuperar credibilidad de inclusión y con esto obtener posibles ventajas competitivas junto con habilidades encontradas en estos pequeños productores, estas ventajas serían las variables concretas que determinan el éxito y sostenibilidad del negocio, las cuales están muy alejadas de los conceptos de filantropía corporativa y RSE (Cano, 2016; Hernández, 2015; Jiménez, Hernández, & Pitre, 2018; Montenegro, Uribe, Garizabal, & Sanchez, 2017). Un factor clave es la decisión y convicción de los altos ejecutivos para cambiar su gestión y formar alianzas estratégicas, así como también la participación de entidades del sector público y entidades financieras por los altos costos que genera un emprendimiento en su inicio (Likoko & Kini, 2017; Vidal, 2008). Sin embargo, muchos de los pequeños negocios que tienen los sectores vulnerables, generalmente solo cubren necesidades que sectores aledaños no pueden obtener. Autores como Cervilla & Puente (2013) o Betancourt & Sagebien (2013) coinciden que en Venezuela, como en muchos otros lugares de América Latina, estos pequeños emprendedores no aspiran a crecer puesto que sus costos son bajos y la mano de obra no es calificada debido a la falta de soluciones financieras, simplemente atienden a los clientes vecinos o compañeros de trabajo por solidaridad (Marín, 2013; Van Haeringen & Jongh, 2010).

Por otra parte, para Castellano, Martínez, & Pelekais (2015), un factor determinante de éxito o fracaso de NI es la participación del gobierno, con ciertas políticas o distintos programas pueden paralizar el desenvolvimiento o avance que tengan los mismos. De igual manera, Lashitew & van Tulder (2017) y Pineda & Falla (2016) expresan que los actos de corrupción o la burocracia gubernamental de países en vías de desarrollo, representa un gran obstáculo, principalmente a las poblaciones vulnerables que tienen consecuencias negativas en el avance socioeconómico, la participación del gobierno en lo que se refiere a ayuda sanitaria, créditos asociativos, incorporar al sector privado o las políticas para conformación de pequeños productores es sumamente importante para su sostenibilidad.

Hasta el momento, el enfoque del NI mantiene una relación entre lo social y lo económico, tomando como objetivo un desenlace recíproco entre las empresas y la

BDP, es decir, alinea los objetivos en común que tendrían los participantes. De aquí surge el concepto de valor compartido y, a más de esto, se agrega el factor ambiental propuesto por Chamberlain & Anseeuw (2017) y Porter & Kramer (2011). Complementando esta definición y enfocándose en el ecosistema, es lógico suponer que las consecuencias de la insostenibilidad ambiental en distintas regiones del planeta experimentan las comunidades pobres, es decir, las inundaciones, sequías o incendios provocan desventajas para pequeños productores por su lenta recuperación y, en respuesta a este desbalance, se busca conciliar el crecimiento económico con las necesidades sociales y la eficiencia ambiental (Gutiérrez & Lobo, 2006; Hart, Sharma, & Halme, 2016; Pineda, 2014).

Principales sectores de aplicación de negocios inclusivos

A partir de estudios que se detallan a continuación, se conoce que el NI se ha desarrollado en sectores como el agrícola y el manufacturero Ickis, Leguizamón, Metzger, & Flores (2009), Lizarralde (2012) y Márquez *et al.* (2009) mencionan que alrededor del 90% de las unidades productivas en América Latina son microempresas y Pymes, las cuales en su gran mayoría colaboran para el desarrollo de un NI y, de igual manera, dichos estudios establecen que la producción mundial del cacao se encuentra en países que pertenecen a los continentes de África (Ghana, Costa de Marfil, Nigeria) y Asia (Indonesia), permitiendo la inclusión de pequeños

agricultores a las cadenas de suministro (Sjaauw-Koen-Fa, Omta, & Blok, 2018). La Tabla 1 presenta los principales objetivos de cada sector y el lugar de su aplicación con éxito.

4. RESULTADOS

4.1. Comparación de elementos comunes de la Estrategia del Océano Azul y el Negocio Inclusivo

A continuación, se exponen los resultados obtenidos mediante la revisión literaria de ambas teorías y se evidencia la relación entre la EOA y el NI. Es relevante mencionar que esta investigación logra determinar que las características de la EOA son aplicadas al momento de ejecutar un NI. Por esta razón, en la Tabla 2 se integran tres puntos primordiales: (i) los principales elementos comunes entre las dos teorías, (ii) las características identificadas en el estudio de la EOA, y (iii) casos de aplicación de NI, siendo el enfoque principal el reciclaje de residuos sólidos en la ciudad de Cuenca.

Con datos proporcionados por AVINA (2015) sobre recicladores de base (miembros de una asociación) de residuos sólidos en Cuenca-Ecuador, se demuestra que la ejecución de NI efectivamente es entendido como una estrategia en la línea de la EOA.

Tabla 1. Principales sectores para la aplicación de negocios inclusivos.

Sector	Objetivo	Lugar de aplicación	Autor
Agrícola	La población más vulnerable se encuentra en los sectores rurales y su gran oportunidad de ofrecer cultivos y cosechas hace que formen parte de la CDV de empresas dedicadas a ofrecer productos comestibles.	Costa Rica, Nicaragua, Colombia, Paraguay, Chile, Ghana y Costa de Marfil.	Enríquez, Ceballos, & Rosero, 2016; Iberbuden, 2016; Márquez <i>et al.</i> , 2009; Sjaauw-Koen-Fa <i>et al.</i> , 2018
Manufacturero	Sacar a los recicladores de las calles y conseguir un progreso al formar parte de emprendimientos asociativos.	Cuenca-Ecuador y Uruguay	Jimbo, 2016; Licandro & Pardo, 2013; The Economist/Intelligence Unit 2017; AVINA, 2015

Tabla 2. Aplicación de elementos de EOA en la ejecución de un NI.

Elementos	Estrategia Océano Azul Características	Negocio Inclusivo Aplicación
Innovación de valor	Alineación entre el precio, costos, utilidad y el enfoque hacia nuevos mercados (Leavy, 2018; Pulgarín & Rivera, 2012).	En Cuenca-Ecuador mediante el reciclaje de plástico llevado a cabo por recicladores de base, empresas como ENKADOR S.A elaboran diversos hilos, cuerdas y filamentos sintéticos de poliéster y nylon para el uso de la industria textil. (AVINA, 2015; Márquez <i>et al.</i> , 2009).
Liderazgo	Influencia del líder sobre los participantes para alcanzar metas y objetivos, prolongando su permanencia y la de sus productos en el mercado por medio de actividades de alto impacto y bajo costo, generando más ingresos (Buengele <i>et al.</i> , 2018; Lupano <i>et al.</i> , 2007).	RENAREC es una organización de reciclaje inclusivo conformada por recicladores de base a nivel nacional y se ha fortalecido de manera significativa a nivel administrativo, operativo y político, esto permite confirmar lo expuesto por Sagebien (2013).

Bajo Costo	Implementación de estrategias que se traducen en la reducción de los costos totales e incremento del valor para los consumidores (Kesavayuth <i>et al.</i> , 2017; Kim & Mauborgne, 2005).	Con base en el trabajo realizado por recicladores de plástico, según AVINA (2015) la empresa INTERCIA de la ciudad de Cuenca ha iniciado un proceso de uso de material PET reciclado para la producción de botellas para uso alimenticio y, a su vez, lograr fabricar botellas de PET con mayor material reciclado forma parte de sus objetivos, este caso confirma lo expuesto por Iberbuden (2016) y Enríquez <i>et al.</i> (2016).
Inclusión social	Se debe incluir a las personas con bajos ingresos y que se encuentran ubicadas en la base de la pirámide, para mejorar su calidad de vida (Che Tu <i>et al.</i> , 2014; Zárate & Gutiérrez, 2013).	Según Licandro & Pardo (2013) con casos de NI aplicados en Paraguay y en Ecuador, a través del Plan Nacional de Buen Vivir 2013-2017, se promueve la inclusión económica y social para el acceso al trabajo digno. En Cuenca, la empresa NOVACERO ha desarrollado un proyecto denominado NOVARED que ofrece capacitación, tecnificación básica y capital de trabajo para que puedan operar pequeños empresarios que incluyen a recicladores de base dentro de su proceso.
Base de la pirámide	Herramienta en la que se puede clasificar a las personas, en base a los ingresos percibidos por medio de una actividad económica que realicen, las mismas que buscarán implementar estrategias con la finalidad de lograr un crecimiento tanto personal como social Latorre <i>et al.</i> (2015).	La teoría de Prahalad & Hammond (2005) se cumple en la ciudad de Cuenca, se evidencia la inclusión de la base de la pirámide a través del reciclaje de residuos sólidos con recicladores de base.
Responsabilidad social empresarial	Preocupación por parte de las empresas por mejorar la vida de la sociedad enfocándose en los ambientes ecológicos, logrando una reducción significativa de la competencia (Avila <i>et al.</i> , 2018; Zárate & Gutiérrez, 2013).	Sosa (2014) y AVINA (2015) mencionan la RSE y en Cuenca, Ecuador, la participación del estado, gobierno central y gobiernos locales, se apegan a las normas vigentes en temas ambientales como la obligatoriedad para la clasificación de residuos sólidos, así como también en términos sociales dentro del marco de la Economía Popular y Solidaria.
Nichos de mercado	Fase en la que se identifica el producto o servicio que las empresas ofertarán y el mercado en el cual participarán, esta búsqueda es una herramienta útil para que las empresas puedan explorar nuevos mercados, captando nueva demanda (Chirinos, 2011; Kamal & Dionne, 2015).	Recicladores de base que están al frente de centros de acopio de residuos sólidos, forman parte de un nicho que empresas pueden aprovechar para formar alianzas estratégicas, generando interesantes propuestas para la inclusión económica y social de recicladores a nivel nacional. De esta manera se cumple la teoría de Porter & Kramer (2011) de valor compartido.
Cadena de valor	Actividades que generan valor a la empresa y el valor que representa cada una de ellas, con el objetivo de crear diferenciación en el mercado Benítez (2012).	ADELCA ha desarrollado proyectos que consisten en la recuperación de material a través de recicladores de base, sus residuos son entregados a un proveedor mayorista que funciona como un centro de acopio que se encarga de clasificar, compactar o cortar. Vidal (2008) coincide con esta perspectiva.
Competitividad	Capacidad que tienen las empresas de producir bienes o servicios para un mercado determinado, con el objetivo de lograr un alto grado de preferencia por parte de los consumidores en comparación con el resto de empresas (Bernal <i>et al.</i> , 2012).	Las exigencias actuales en el mercado de reciclaje obligan a los recicladores a ser competitivos, ofreciendo productos de buena calidad y bajo costo según los datos analizados (AVINA, 2015; Lizarralde, 2012; Márquez <i>et al.</i> , 2009).

El enfoque en la innovación propia es una característica elemental de la EOA mientras que el enfoque de NI es la inserción social de la BDP con la colaboración

empresarial. En Cuenca se han cumplido estos enfoques mediante empresas que han permitido la inclusión de recicladores de residuos sólidos en su CDV y, al mismo

tiempo, se han realizado cambios en sus procesos de producción, dejando en evidencia su éxito a través de reducción de costos y una mejora continua en sus productos, siempre teniendo presente el cuidado ambiental que tiene como objetivo el reciclaje.

Con base en la información obtenida, a través del cuadro de elementos comunes, se encontró que los casos de NI ejecutados en la ciudad de Cuenca en la industria manufacturera del reciclaje, no priorizan la competencia, puesto que al relacionar el NI con la EOA se cumple con la característica de ser competitivo en el instante que las empresas consideran a la BDP como socios estratégicos, ofreciéndoles sostenibilidad y sustentabilidad por su tiempo prolongado en el mercado.

La combinación de estas dos teorías ha creado expectativas de replicabilidad hacia otros contextos o áreas. En esta investigación se logró identificar dicha combinación como un modelo de negocio y el éxito que tuvo dentro de dos sectores como son: primario, con actividades sujetas a la adquisición de recursos de fuentes naturales como es la agricultura, y, secundario o industrial, con empresas dedicadas a la transformación de la materia prima en producto terminado integrando a la BDP en su CDV de forma eficiente mediante el reciclaje de residuos sólidos. Otro sector que cumple con todos los parámetros que forman parte de los resultados entre la combinación de NI y EOA (Tabla 2) es el sector terciario o de servicios, siendo una opción la rama del turismo comunitario o turismo rural que tiene por objetivo: *“El turismo comunitario debe ser capaz de promover un desarrollo integral para las comunidades, mitigando la pobreza (material) a través de la generación de empleo e ingresos económicos complementarios, evitando la migración de su población, fomentando una distribución justa de los ingresos y contribuyendo a la conservación del medio ambiente”* (Inostroza, 2018, p. 80).

Dicha comunidad posee características propias de la BDP como son: la conformación de personas con bajos ingresos, la existencia de necesidades y fortalezas que pueden ser desarrolladas mediante una planificación conjunta entre miembros, dirigentes comunitarios y organizaciones (entidades gubernamentales, sector público y privado, ONG's) a través de ordenanzas, leyes, normativas que articulen los intereses de forma compartida entre la comunidad y entidades participantes, obteniendo como resultado una mejora en la calidad de vida del sector vulnerable que pueden empezar a ser considerados como actores económicos y con esto generar equidad de oportunidades laborales, promoviendo el turismo sostenible y la inclusión.

Al ser un NI un emprendimiento social, es necesario medir su escalabilidad, Jablonski (como se citó en Cavazos & Giuliani, 2017) determina la diferencia entre la escalabilidad económica y la social: define a la escalabilidad económica como la habilidad de mantener un similar o mayor desempeño en el modelo de negocio, sea incrementando o reduciendo los componentes y recursos y a la escalabilidad social como el incremento del impacto del propósito social orientado a una mejor y mayor magnitud de la atención de la necesidad o del problema social (Cavazos & Giuliani, 2017).

En términos económicos, el escalamiento en emprendimientos sociales tiende a ser un proceso más lento debido a varios factores como son: políticas económicas por parte del estado, escasas designaciones presupuestarias, la falta de sustentabilidad financiera y por

los cambios que generaría en una cultura organizacional ya establecida. Sin embargo, es necesario resaltar que cada emprendimiento económico o social posee retos propios de sus modelos. *“Después de una espiral de escalabilidad, se espera que los resultados se observen especialmente en el incremento de utilidades para los emprendimientos económicos y en la multiplicación de la generación de bienestar social para los emprendimientos sociales”* (Cavazos & Giuliani, 2017). Dicho esto, se puede evidenciar (Tabla 2) que a pesar de la resistencia al cambio de paradigmas mentales y la visión cultural dentro de una sociedad, se logra un incremento en cuanto a la escalabilidad social con la aplicación de NI del reciclaje en la ciudad de Cuenca, generando posibles soluciones al estilo de vida de recicladores de residuos sólidos, sin perder la cualidad de inclusivo y ecológico.

De esta manera, la relación de estas dos teorías es significativa para las personas que se encuentran en la base de la pirámide, la participación de recicladores de base de residuos sólidos en la economía de la industria manufacturera permite confirmar el acceso a oportunidades laborales que brinda este NI y su mejora en la calidad de vida, suministrando sus necesidades básicas por lo que contribuyen al progreso social y el desarrollo económico en la ciudad.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La EOA ha sido aplicada por el sector empresarial de manera global, sin especificar un sector en particular, enfocada en la innovación propia. Esta teoría ha evolucionado y logrado cambiar la perspectiva de las empresas, de tan solo mantener productos y servicios diferenciados a lograr una innovación metodológica de producción con la inclusión de la BDP. Por otro lado, el NI aplicado a nivel mundial es un hecho que considera a las personas de la BDP como proveedores de materia prima para las empresas, en consecuencia, el NI se convierte en una estrategia innovadora empresarial por su enfoque no solamente en las personas de sectores vulnerables sino también en sus procesos productivos, buscando competitividad en el mercado.

Los elementos comunes encontrados en el presente trabajo, permiten identificar que la aplicación de la EOA denominada NI se puede convertir en un riesgo para las personas que pertenecen a la base de la pirámide, debido a que los líderes empresariales no mantienen el ritmo de innovación, puesto que una vez cumplido su objetivo principal, esto es, generar mayores ingresos, olvidan otros intereses como el de mejorar el estilo de vida de sus colaboradores y esto da como resultado la confusión de términos con filantropía o publicidad para mejorar su imagen corporativa. Esta iniciativa es aplicada con mayor incidencia en Latinoamérica, en donde gran parte de la población se encuentra ubicada en la BDP, debido a que no forma parte de ninguna actividad económica, desencadenando un alto nivel de pobreza, sin embargo, esta aplicación no es limitada y presenta grandes heterogeneidades tanto sectorial como geográficamente, siempre y cuando se cumplan con las condiciones de inclusión e innovación, introduciendo productos o servicios que mejoren la calidad de vida de sus consumidores, creando un impacto positivo en las personas que se encuentran en la BDP, brindándoles

oportunidades económicas y laborales, para lo cual es necesario que existan alianzas estratégicas entre estas personas y empresas. En este contexto, se puede mencionar a la Fundación AVINA y al Servicio Holandés de Cooperación al Desarrollo (SNV) como las instituciones que promueven los NI en Latinoamérica, al mismo tiempo se debe considerar al gobierno central como el ente que motive a las empresas a involucrarse en este tipo de modelo de negocio, por medio de la implementación de alianzas con los municipios y todo tipo de organizaciones públicas y privadas, volviéndolos atractivos a través de la inclusión de esta iniciativa dentro de leyes que brinden la generación de condiciones empresariales, fiscales y legales que aporten con beneficios, compensaciones y réditos, atrayendo a inversionistas que estén dispuestos a contribuir al desarrollo social y económico de cada país.

En los últimos años se ha detectado la efectividad de la aplicación de la estrategia empresarial de NI a nivel de América Latina en el sector agrícola, por lo que se sugiere a entidades de la industria del reciclaje su mayor participación en este modelo de negocio, a través de las características de sostenibilidad y sustentabilidad tanto para recicladores como para empresarios y, de esta manera, demostrar, además del concepto filosófico, el impacto que causa la aplicación operativa de estas teorías estrechamente relacionadas.

En la ciudad de Cuenca, se evidencia el éxito de esta estrategia entendida como NI que está encaminada a preservar el medio ambiente, la mejora continua en la calidad de vida de los recicladores de base y al bienestar empresarial, enfocándose en una visión de valor compartido, permitiendo a otras industrias la posibilidad de considerar y ejecutar esta estrategia que genera valor económico y social.

La presente investigación encontró una estrecha relación entre las teorías de EOA y NI, teorías ampliamente reconocidas a nivel mundial por su extenso contenido teórico como por sus aplicaciones. Por esto, es de vital importancia para el mundo empresarial y para los investigadores, generar conocimientos que consoliden una base científica que aporte un entendimiento profundo a cerca de su comportamiento de una manera global, permitiendo involucrarse en nuevos campos de aplicación, conceptualizándolos de una manera integral y no como herramientas separadas. Esto propiciará la generación de nuevas metodologías y nuevos conceptos que aporten a la evolución de esta aplicación en este y otro tipo de contextos que cumplan con las condiciones mencionadas anteriormente, para lograr que estas teorías puedan constituirse como un beneficio de estrategias empresariales y en una contribución para futuras investigaciones.

REFERENCIAS

- Agnihotri, A. (2016). Extending boundaries of Blue Ocean Strategy. *Journal of Strategic Marketing*, 24(6), 519-528.
- Avila, L. A., Solís, M. M., Zayas, C., Galván, J. A. (2018). Innovation and Growth: Evidence from Mexico and Brazil. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 783, 150-160.

- AVINA. (2010). *Negocios y mercados inclusivos. Definición y marco conceptual para el trabajo*. Disponible en <http://www.informeavina2010.org/espanol/mercados.shtml>
- Barreda, H. V. (2013). Taxonomía de las estrategias. *International Journal of Knowledge Engineering and Management*, 2(2), 36-51.
- Becker, H. (2006). La Estrategia del Océano Azul y el cuadro de mando integral. *Folletos Gerenciales*, 10(8), 1-10.
- Benítez, M. (2012). Evolución del concepto de competitividad. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, 3(8), 75-82.
- Bernal, C. A., Fracica, G., Frost, J. S. (2012). Análisis de la relación entre la innovación y la gestión del conocimiento con la competitividad empresarial en una muestra de empresas en la ciudad de Bogotá. *Estudios Gerenciales*, 28 (Edición Especial), 303-315.
- Betancourt, R., Sagebien, J. (2013). Para un crecimiento inclusivo: empresas no estatales responsables en Cuba. *TEMAS*, 75, 58-65.
- Borges, A., Montero, J. (2013). La innovación como valor y factor de éxito. *Harvard Deusto Business Review*, 223, 18-25.
- Bruni, J., González, R. (2010). Negocios rentables con impacto social. *DEBATES IESA*, 15(3), 14-19.
- Buengele, C., Leroyb, H., De Stobbeleir, K. (2018). How leaders shape the impact of HR's diversity practices on employee inclusion. *Human Resource Management Review*, 28(3), 289-303.
- Bustamante, C., Muñoz, Y. (2017). Propuesta de negocio inclusivo: hacia un modelo de inclusión social de sachu inchi en el Bajo Cauca antioqueño. *Equidad y Desarrollo*, 27, 125-147.
- Cano, M. E. (2016). Negocio inclusivo: gana-gana sostenible. Encadenamiento productivo: Caso Asociación de Recicladores de Calí. *Ploutos*, 3(2), 24-33.
- Carrillo, Y. P., Cristancho, P. A., Silva, E. K. (2015). Análisis de los factores que inciden en la competitividad en las pequeñas empresas colombianas. *Ensayos: Revista de Estudiantes de Administración de Empresas*, 8, 72-85.
- Castellano, M., Martínez, L., De Pelekais, C. (2015). Negocios inclusivos: Rentabilidad o filantropía empresarial. *Forum Humanes*, 4(1), 14-30.
- Cavazos, J., & Giuliani, A. C. (2017). Escalabilidad: concepto, características y retos desde el Emprendimiento Comercial y Social. *Cuadernos del CIMBAGE*, 19, 27-41.
- Cervilla, M. A., Puente, R. (2010). Cómo reconstruir fronteras del mercado para crear Océanos Azules. *DEBATES IESA*, 15(2), 12-17.
- Cervilla, M. A., Puente, R. (2013). Modelos de negocio de emprendimientos por y para la base de la pirámide. *Revista de Ciencias Sociales*, 19(2), 289-308.
- Chamberlain, W., Anseeuw, W. (2017). Contract farming as part of a multi-instrument inclusive business structure: A theoretical analysis. *Agrekon*, 56(2), 158-172.
- Che Tu, J., Chieh Shih, M., Ying Hsu, C., Hao Lin, J. (2014). Developing Blue Ocean Strategy of sustainable

- product design and development for business opportunities of BOP groups in Taiwan. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 1-24.
- Chirinos, C. (2011). Nicho de mercado: El enfoque desde el océano azul. *Ingeniería Industrial*, 29, 173-181. doi:10.26439/ing.ind2011.n029.233
- Correia, L. X., Barbosa, R., Epaminondas, J. (2015). La estrategia del océano azul: un estudio de caso en una empresa de servicios en la ciudad de campana grande - pb. *GEINTEC*, 5(3), 2348-2365.
- Díaz, A. (2014). Innovación, tecnología y conocimiento: "Ingredientes para impulsar el desarrollo sostenible en el país". *Revista Ingeniería, Matemáticas y Ciencias de la Información*, 12, 79-86.
- Enríquez, C., Ceballos, H., Rosero, P. (2016). Caso innovación organizacional a través de negocios inclusivos Melkochas Don José. *Revista Unimar*, 34(2), 137-149.
- Ezequiel, R. (2010). Inclusivos y responsabilidad social: Un matrimonio complejo. *Debates IESA*, 15(3).
- Gómez, J. A., Garrido, F. J. (2011). Prácticas efectivas e innovadoras de crecimiento y competitividad de negocios: Creciendo en épocas de crisis y complejidad en los mercados. *Strategy & Management Business Review*, 2(1), 17-24.
- Gutiérrez, R., Lobo, I. D. (2006). Es posible aliviar la pobreza a través de los negocios? *Harvard Review of Latin America*, 6(1), 39-41.
- Hahn, R. (2012). Inclusive business, human rights and the dignity of the poor: a glance beyond economic impacts of adapted business models. *Business Ethics: A European*, 21(1), 47-63.
- Hart, S., Sharma, S., Halme, M. (2016). Poverty, business strategy, and sustainable development. *Organization & Environment*, 29(4), 401-415.
- Hernández, P. (2015). Alternativas de modelos de negocios para las mipymes colombianas desde la responsabilidad social empresarial, el comercio justo, los negocios inclusivos y el valor compartido. *Cooperativismo y Desarrollo*, 23(107).
- Iberbuden, E. (2016). Factores principales de éxito en la cadena de valor de emprendimientos empresariales inclusivos: Estudio de cuatro casos empresariales en Paraguay que fomentan la inclusión a través de la innovación y el valor compartido en su cadena de valor. *Revista Científica de Iniciación a la Investigación*, 1(1), 1-20.
- Ickis, J., Leguizamón, F., Metzger, M., Flores, J. (2009). La agroindustria: campo fértil para los negocios. [Agroindustry: Fertile ground for inclusive business]. *Revista Latinoamericana de Administración*, 43, 107-124.
- Inostroza, G. (2018). Aportes para un modelo de gestión sostenible del turismo en la Región Andean. *Gestión Turística*, 10, 77-90.
- Jimbo, S. (2016). El negocio inclusivo de reciclaje entendido como una estrategia empresarial a desarrollar por la industria manufacturera de papel y cartón en la ciudad de Cuenca-Ecuador. *Revista Economía y Política*, 6(24), 147-167.
- Jiménez, A., Hernández, H. G., Pitre, R. (2018). Emprendimiento social y su repercusión en el desarrollo económico desde los negocios inclusivos (Colombia). *Revista LOGOS CIENCIA & TECNOLOGÍA*, 10(2), 198-211.
- Jones, J. N. (2016). Inclusive innovation: A source of new ideas to deliver business growth. *Research-Technology Management*, 59(5), 12-14.
- Kamal, A. H., Dionne, J. (2015). A Blue Ocean Strategy for palliative care: Focus on family caregivers. *Journal of Pain and Symptom Management*, 51(3), 1-3.
- Kesavayuth, D., Lee, S. H., Zikos, V. (2017). Merger and innovation incentives in a differentiated industry. *International Journal of the Economics of Business*, 25(2), 207-221.
- Kim, W. C., Mauborgne, R. (2005). *La Estrategia del Océano Azul*. Bogotá: Grupo Editorial Norma.
- Kim, W. C., Mauborgne, R. (2009). Navegar en el Océano Azul: Cómo la estrategia moldea la estructura. *Harvard Business Review*, 87(9), 81-89.
- Kim, W. C., & Mauborgne, R. (2014). Los cuatro pilares del liderazgo en la Estrategia del Océano Azul. *Gestión & Desarrollo*, 11, 205-209.
- Lashitew, A. A., van Tulder, R. (2017). Inclusive business in Africa: Priorities, strategies and challenges. *Entrepreneurship in Africa*, 15, 71-94.
- Latorre, E. L., Díaz, C. C., Plata, A. M., Marín, S. P. (2015). Caracterización de dos experiencias exitosas de negocios inclusivos en Colombia. *Civilizar*, 15(28), 197-212.
- Leavy, B. (2018). Value innovation and how to successfully incubate "blue ocean" initiatives. *Strategy & Leadership*, 46(3), 10-20.
- Licandro, O. D., Pardo, L. (2013). *Experiencias de negocios inclusivos en el Uruguay*. Montevideo: Universidad Católica del Uruguay.
- Likoko, E., Kini, J. (2017). Inclusive business - a business approach to development. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 24, 84-88.
- Lillo, A., Ramón, A. B., Sevilla, M. (2007). EL capital humano como factor estratégico para la competitividad del sector turístico. *Cuadernos de Turismo*, 19, 47-69.
- Lizarralde, R. D. (2012). De las alianzas estratégicas a los negocios inclusivos. *Revista Palmas*, 33(2), 93-111.
- Lohtande, M., Aholainen, A., Volotinen, J., Peltokoski, M., Ratava, J. (2017). Location independent manufacturing - Case-based Blue Ocean Strategy. *Procedia Manufacturing*, 11, 2034-2041.
- Lupano, M. L., Benatui, D., Nader, M. (2007). Concepciones teóricas acerca del liderazgo. En: A. Castro Solano. *Teoría y Evaluación del Liderazgo* (págs. 10-26). Buenos Aires: Paidós SAICF.
- Marín, R. A. (2013). Producto Daviplata: Un negocio inclusivo con responsabilidad social. *Revista Vox Populi*, 12, 103-112.
- Marquéz, P. (2007). Negocios para la inclusión: Un nuevo paradigma empresarial. *Debates IESA*, 6(1).
- Márquez, P., Reficco, E., Berger, G. (2009). Negocios Inclusivos en América Latina. *Harvard Business Review*, 87(5), 28-38.
- Martínez, F. M., Carmona, G. (2009). Aproximación al concepto de "Competencias Emprendedoras": Valor social e implicaciones educativas. *Revista Iberoamericana sobre Calidad, Eficacia y Cambio de Educación*, 7(3), 82-98.

- Mendoza, T. (2013). La estrategia del océano azul para emprendedores. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 3(1), 76-80.
- Montenegro, A., Uribe, A., Garizabal, M., Sanchez, M. (2017). Negocios inclusivos beneficio compartido entre empresas y poblaciones vulneradas de Latinoamérica. *Revista Espacios*, 38(59), 1-9.
- Orlov, A. K., Chubarkina, I. Y. (2017). Blue ocean strategy application in the course of planning and implementation of construction projects in the area of SMART housing and social infrastructure. *MATEC Web of Conferences*, 106, 1-8.
- Peerally, J. A., De Fuentes, C., Figueiredo, P. N. (2018). Inclusive innovation and the role of technological capability-building: The social business Grameen Danone Foods Limited in Bangladesh. *Long Range Planning* (in press).
- Pineda, L. (2009). Pensamientos y enfoques alrededor de la estrategia como concepto según diferentes autores. *Centro de Estudios Empresariales para la Perdurabilidad*, 8, 4-41.
- Pineda, M. A. (2014). Negocios y sostenibilidad en la Base de la Pirámide. *Punto de Vista*, 5(9), 95-116.
- Pineda, M., Falla, P. (2016). Los negocios inclusivos como fuente de trabajo de calidad para pequeñas empresarias en condición de pobreza: un estudio exploratorio en el municipio de Apartadó, Colombia. *Equidad & Desarrollo*, 25, 179-208.
- Porter, M. E., Kramer, M. R. (2011). La creación de valor compartido. *Harvard Business Review*, 89(1), 32-49.
- Prahalad, C. K., L. Hart, S. (2002). *The fortune at the bottom of the pyramid*. Published by Booz & Company. Disponible en <https://www.strategy-business.com/article/11518>
- Prahalad, C. K., Hammond, A. (2005). Atender a los pobres del mundo, rentablemente. *Harvard Business Review*, 83(8), 87-99.
- Puente, R., Auletta, N. (2009). El dilema de la escala. *DEBATES IESA*, 14(1), 18-24.
- Pulgarín, S. A., Rivera, H. A. (2012). Las herramientas estratégicas: Un apoyo al proceso de toma de decisiones gerenciales. *Criterio Libre*, 10(16), 89-114.
- Rodríguez, G., Antolinez, J. (2015). Evolución diacrónica del pensamiento estratégico. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 18(2), 533-542.
- Sabogal, J. (2008). Aproximación y cuestionamientos al concepto responsabilidad social empresarial. *Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión*, 16(1), 179-195.
- Salamanca, E. J., Uribe, C. A., Mendoza, L. M. (2017). ¿Cómo desarrollar un nuevo mercado donde la competencia no tiene ninguna? *Dictamen Libre*, 20, 107-120.
- Sharma, P. (2016). Vini cosmetics: the blue ocean strategy to unlock new markets and boost profits. *International Journal of Entrepreneurship and Innovation Management*, 20(5), 360-368.
- Sierra, W., Ortiz, Á. N., Rangel, O., Alvarado, M. (2010). Liderazgo moderno y tendencias gerenciales: cambios paradigmáticos en la gestión de la universidad como empresa del conocimiento. *Revista Científica Guillermo de Ockham*, 8(2), 11-22.
- Sjauw-Koen-Fa, A. R., Omta, S. O., Blok, V. (2018). Constructing a multinationals' inclusive sourcing indicator for impacting farmer business models: Application in cocoa cases. *International Journal on Food System Dynamics*, 9(3), 207-225.
- Sosa, M. (2014). Desarrollo local e inserción internacional: Negocios inclusivos. *Revista Cubana de Economía y Sociedad*, 2, 1-23.
- Stivale, S., González, M. (2012). El mercado de productos de diseño sustentables en la ciudad de Mar del Plata, situación actual y expectativas. *I+A Investigación + Acción*, 15(14), 139-160.
- The Economist/Intelligence Unit. (2017). *Avances y desafíos para el reciclaje inclusivo: Evaluación de 12 ciudades de América Latina y el Caribe*. New York,NJ: The Economist/Intelligence Unit.
- Torres, M., García, J. A., Pulido, J. I. (2013). Cambio de paradigma en el marketing de destinos turísticos: el plan cma experience. *Cultur*, 7(2), 4-32.
- Valencia, J. F. (2008). Fidelización y Lealtad como estrategias para impactar favorablemente el recaudo y la cartera de las empresas. *El Cuaderno*, 2(3), 11-22.
- Van Haeringen, R., Jongh, W. (2010). Los negocios inclusivos en el sector agropecuario: práctica y desafíos. *Estudios Agrarios*, 44, 63-74.
- Vargas, M. Á., Muñoz, M., Santoyo, V. H. (2015). Estrategias de diferenciación en cuatro modelos de negocio de carne bovina. *Revista Global de Negocios*, 3(2), 23-49.
- Vidal, P. (2008). Negocios inclusivos y desarrollo social. *Mensaje*, 57(572), 37-38.
- Virah-Sawmy, M. (2015). Growing inclusive business models in the extractive industries: Demonstrating a smart concept to scale up positive social impacts. *The Extractive Industries and Society*, 2(4), 676-679.
- Wee, C. H. (2017). Think Tank - Beyond the five forces model and Blue Ocean Strategy: An integrative perspective from Sun Zi Bingfa. *Global Business and Organizational Excellence*, 36(2), 34-45.
- Wengel, J. T., Ferreira, G. B., Pérez, G., Suárez, L. M. (2010). Schumpeter and the Blue Ocean Strategy. *Rev. maestr. derecho econ.*, 6(6), 53-85.
- Zarate, J. d., Gutiérrez, W. E. (2013). Estrategias gerenciales como mecanismo de responsabilidad social en el sector turístico de Santa Marta-Colombia. *Clio América*, 7(14), 153-163.
- Zúñiga, A. (2012). ¿Es la búsqueda océanos azules el cambio de paradigma necesario en el direccionamiento estratégico? *Magazín Empresarial*, pp. 63-69.



Comparación de las eficiencias de recuperación de lípidos de las microalgas *Chlorella* y *Scenedesmus* obtenidas con diferentes disolventes



**María J. Pérez¹, Jenny Quishpi¹, Guillermina Pauta¹, Fabián León², Juan F. Cisneros², Verónica Pinos^{2,3},
Andrés Alvarado^{1,3}**

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca, Av. 12 de Abril y Ciudadela Universitaria, Cuenca, Ecuador.

² Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Cuenca, Av. 12 de Abril y Ciudadela Universitaria, Cuenca, Ecuador.

³ Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales, Universidad de Cuenca, Campus Balzay, Cuenca, Ecuador.

Autor para correspondencia: andres.alvarado@ucuenca.edu.ec; juan.cisneros@ucuenca.edu.ec

Fecha de recepción: 18 de octubre de 2018-Fecha de aceptación: 11 de diciembre de 2018

RESUMEN

Las microalgas son capaces de producir lípidos que pueden ser usados para obtener biocombustibles de tercera generación, los cuales buscan reemplazar a los combustibles fósiles. Los objetivos de este estudio fueron: determinar la composición de lípidos de las microalgas *Chlorella* y *Scenedesmus* usando el método gravimétrico; determinar la eficiencia de diferentes solventes para la extracción de lípidos con el método Soxhlet; y comparar las productividades de recuperación de lípidos de las microalgas *Chlorella* obtenidas con pretratamientos térmico y físico. Los resultados obtenidos muestran que se recuperó la mayor cantidad de lípidos, un 20.37% por muestra seca, en la microalga *Chlorella* usando una mezcla de disolventes cloroformo: metanol en proporción 1:2. El aumento de la cantidad de lípidos, generado con el uso de pretratamientos, no justifica su uso, por lo que se recomienda que no se aplique un pretratamiento. Los resultados permiten establecer una línea base en el aprovechamiento de microalgas cultivables en la serranía ecuatoriana para la obtención de lípidos para biocombustibles.

Palabras clave: lípidos, extracción, microalgas, biodiesel, disolventes.

ABSTRACT

The lipids of microalgae are the source for obtaining third-generation biofuels so that fossil fuels can be replaced. The objectives of this study were to determine the composition of the lipids of *Chlorella* and *Scenedesmus* microalgae using the gravimetric method; Determine the efficiency of different solvents for the extraction of lipids with the Soxhlet method and compare the lipid recovery productivities of *Chlorella* microalgae with thermal and physical pretreatments. The highest amount of lipids, 20.37% per dry sample, the microalga, the *Chlorella*, the solvent mixture, the chloroform:methanol in a 1:2 ratio. The increase in the amount of lipids generated with the use of pretreatments no justifies its use for which it is recommended that no pretreatment be applied. The results allow to establish a baseline in the use of microalgae cultivable in the Ecuadorian mountain to obtain lipids for biofuels.

Keywords: lipids, extraction, microalgae, biodiesel, solvents.

1. INTRODUCCIÓN

El rápido incremento de la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera, combinado con el desgaste de las reservas de combustibles fósiles, ha conducido a un mayor interés comercial en las fuentes de energía renovables (Halim, Danquah, & Webley, 2012; Arias-Peñaranda, Martínez-Roldán, & Cañizares-Villanueva, 2013). Las microalgas tienen una capacidad de crecer rápidamente, sintetizar y acumular grandes cantidades de lípidos (Grobbelaar, 2004; Chen, Zhao, & Qi, 2015). Una industria de producción de aceite de algas, exitosa y económicamente viable, dependerá de la selección de cepas apropiadas de microalgas y de la selección del mejor método de extracción de lípidos (Araujo *et al.*, 2013). Una alternativa altamente fiable es el biodiesel producido mediante transesterificación de lípidos extraídos de microalgas, con una huella de carbono neutral, siendo una tecnología que no compite con cultivos agrícolas

tradicionales (Medipally, Yusoff, Banerjee, & Shariff, 2015). Sin embargo, existe una alta variabilidad entre las especies de microalgas referente a su capacidad para sintetizar sustancias oleaginosas que depende, en gran medida, de las características ambientales y concentración de nutrientes del medio que las sustenta (Abou-Shanab, Hwang, Cho, Min, & Jeon, 2011; Amaro, Guedes, & Malcata, 2011).

La biomasa de microalgas contiene tres componentes principales: proteínas, carbohidratos y lípidos (aceite) (Dragone, Fernandes, Vincete, & Teixeira, 2010). Los lípidos pueden ser definidos como cualquier molécula biológica que es soluble en un solvente orgánico. La mayoría de los lípidos contienen ácidos grasos y, generalmente, pueden clasificarse en dos categorías en base a su polaridad: (1) lípidos neutros, que comprenden acilglicerol y ácidos grasos libres (FFA); y, (2) lípidos polares, que pueden subclasificarse en fosfolípidos (PL) y glicolípidos (GL) (Halim *et al.*, 2012).



El proceso de producción de biodiesel a partir de microalgas está conformado en términos generales por las etapas indicadas en la Figura 1 (Garibay, Vázquez-Duhalt, Sánchez, M.d.P., Serrano, & Martínez, 2009). Para el cultivo de biomasa, el agua, los nutrientes, el CO₂ y la luz, son proporcionados a los sistemas de cultivos (abiertos, cerrados o híbridos). El CO₂ suministrado puede provenir del aire del ambiente, o bien, los sistemas de cultivo pueden ser acoplados a flujos ricos con este gas procedente de emisiones industriales, tales como las de las plantas

generadoras de energía eléctrica. En la Cosecha, la biomasa producida es separada del agua (Cai, Park, & Li, 2013). El Secado, y la Extracción de lípidos, seguido por la Conversión de lípidos extraídos a biodiesel y glicerol mediante la Transesterificación, y, finalmente, la purificación del biodiesel producido (Garibay *et al.*, 2009; Taher, Al-Zuhair, Al-Marzouqi, Haik, & Farid, 2014; Khan, Shin, & Kim, 2018).

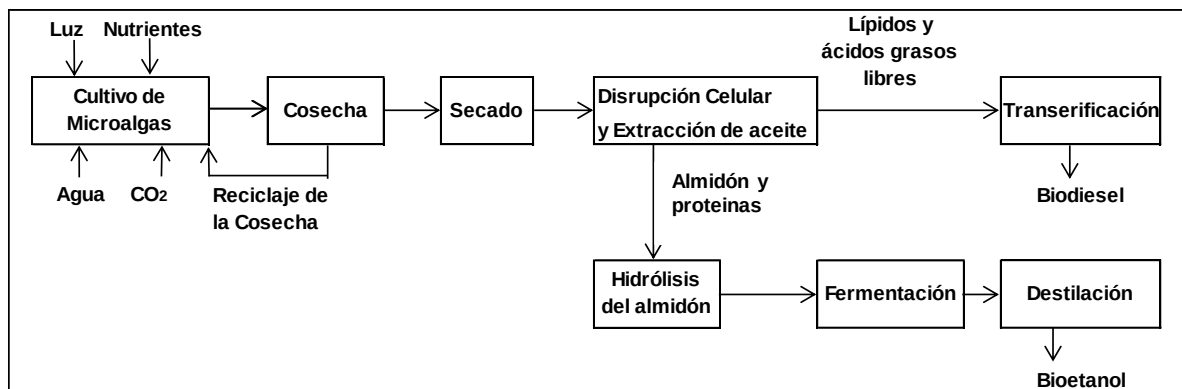


Figura 1. Proceso integrado de producción de biodiesel y bioetanol a partir de microalgas (Garibay *et al.*, 2009).

Con el fin de producir biodiesel a partir de la biomasa celular algal, los lípidos deben ser extraídos de la célula y recolectarse (Lee, Lewis, & Ashman, 2012). Esto requiere la interrupción o ruptura de la célula algal y se puede lograr usando una variedad de métodos como la rotura mecánica y química, la extracción con solvente, la extracción con fluidos supercríticos, y combinaciones o variaciones de estas técnicas (Sathish & Sims, 2012). Varios métodos de extracción pueden ser utilizados para extraer el lípido a partir de biomasa seca de microalgas. Las técnicas más usadas son Folch, Bligh y Dyer, y Soxhlet (Taher *et al.*, 2014). Existen varios estudios de la etapa de extracción del aceite de las microalgas para su posterior transformación a biodiesel debido a la importancia de esta etapa en la eficiencia y los costos globales del proceso (González, Viatcheslav, & Guzmán, 2009). Técnicas de extracción con solvente son ampliamente usadas y eficaces para la extracción de lípidos a partir de microalgas (Brennan & Owende, 2010). Esto es debido a la alta solubilidad de los lípidos en solventes no polares tales como cloroformo, hexano y éter de petróleo.

Existen diferentes protocolos de extracción estándar tal como la extracción Folch, Bligh y Dyer, y el Soxhlet o técnicas de Gold-Fisch. Aunque el uso de solventes para extraer lípidos de algas es bastante sencillo, hay inconvenientes cuando se aplica a las microalgas. Para tener resultados óptimos, la extracción requiere que el agua se elimine de la biomasa antes de la extracción de lípidos. Si la biomasa no se seca hasta un cierto punto, el agua tiende a interferir en el proceso de extracción, protegiendo los lípidos de la extracción con el solvente. Una gran cantidad de solventes se han utilizado como solventes de extracción en el método Soxhlet, el uso de un solvente no polar será selectivo al extraer lípidos no polares de las microalgas como los triglicéridos, los cuales son lípidos ideales para la producción de biodiesel (González *et al.*, 2009).

Además de los desafíos de extracción, el contenido de lípidos de las células de microalgas es importante ya que varía por especie de alga (Milano *et al.*, 2016). La efectividad promedio de la producción de biodiesel de microalgas depende de la productividad del lípido, que es un efecto combinado de la productividad de biomasa y el contenido de lípidos. El contenido de lípidos informado de microalgas está en el intervalo de 20-30% (base seca) cuando las microalgas se cultivan en condiciones controladas, con suficientes nutrientes. Sin embargo, bajo condiciones de estrés, las microalgas pueden acumular mayor contenido de lípidos. La primera condición de estrés, aplicada a las microalgas verdes, es la deficiencia de nitrógeno, donde acumulaciones de más de 50% (base seca) han sido reportadas. Esto se debe principalmente a la falta de nitrógeno necesario para la síntesis de proteínas. El exceso de carbono de la fotosíntesis se desvía hacia la vía de la producción de lípidos (Raja, Shanmugam, Ganesan, & Carvalho, 2014).

Dentro de las varias alternativas tecnológicas, la producción de biocombustibles ha recibido mucho interés científico en las últimas décadas (Milledge, 2011; Quinn & Davis, 2015). Los métodos actuales de cultivo de microalgas para producción de biocombustibles resultan costosos (Jonker & Faaij, 2013; Fon Sing, Isdepsky, Borowitzka, & Moheimani, 2013), por lo que una alternativa económica y ambientalmente viable sería aprovechar los efluentes de sistemas lagunares tales como lagunas de estabilización (WSP) y lagunas de algas de alta tasa (HRAP), que contienen altas concentraciones de estos microorganismos (Durazno, 2009), con una notable reducción de la huella de carbono global generada por el sistema de tratamiento. Aunque el uso solo de HRAP's para la producción de biocombustibles no es económico, el acoplamiento del tratamiento de las aguas residuales con la producción de biocombustibles se considera financieramente viable (Sutherland, Turnbull, Broady, & Craggs, 2014; Sutherland, Howard-Williams, Turnbull,

Broady, & Craggs, 2014). Una gran ventaja de las HRAP's sobre las WSP's es la recuperación del recurso de la biomasa algal, para usarse como fertilizante, alimento rico en proteínas o biocombustible, y agua como efluente tratado a un estándar alto. Los principales tipos de algas presentes en WSP son las verdes (Chlorophyta) y las pigmentadas (Euglenophyta). Los géneros más importantes de estos grupos son *Chlorella*, *Chlamydomonas* y *Euglena*, de los cuales estos dos últimos poseen flagelos. Una tercera división de algas presentes en el sistema son las Cianobacterias, que poseen características de bacterias y algas pero que son clasificadas como bacterias. Estos organismos no tienen orgánulos locomotores, pero son capaces de moverse a través del sistema por deslizamiento. Las Cianobacterias típicamente proliferan en condiciones de pH bajo y baja disponibilidad de nutrientes, lo que es un ambiente desfavorable para el crecimiento de las Chlorophytas. Las Cianobacterias más importantes presentes en las WSP's son *Oscillatoria*, *Phormidium*, *Anacystis* y *Anabaena*. Otros tipos de algas que se pueden encontrar en las WSP's son Bacillariophyta y Chrysophyta (Sperling, 2007). Las especies de algas que comúnmente se encuentran en las plantas de tratamiento del tipo HRAP's (e.g. *Scenedesmus* sp, *Micractinium* sp, *Actinastrum* sp, y *Pediastrum* sp) pueden crecer como colonias grandes sedimentables (diámetro de colonia de 50 a 200 μm), y también forman grandes bio-flóculos (diámetro $>500 \mu\text{m}$), asociados con bacterias (Alvarado, Vedantam, Goethals, & Nopens, 2012).

El objetivo de este estudio es realizar un análisis cuantitativo de la composición de lípidos de varias familias de microalgas para su potencial uso como biocombustibles con procedimientos gravimétricos. Además, determinar la eficiencia de extracción usando diferentes solventes para la extracción de lípidos a partir de biomasa algal con el método Soxhlet. Estudiar la productividad de lípidos con las microalgas *Chlorella* y *Scenedesmus* cultivadas bajo diferentes condiciones de nutrientes. Finalmente, comparar la productividad de lípido aplicando un pretratamiento de disrupción celular térmico y físico a la biomasa de la microalga *Chlorella* con respecto a la biomasa sin pretratamiento. Este proyecto representa una fase inicial de investigación que permitirá establecer futuras líneas de investigación para aprovechar las nuevas fuentes de energía renovable como el biocombustible, producido mediante la extracción de lípidos de microalgas en las condiciones expuestas de la serranía ecuatoriana.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Instrumentos

Una centrífuga Thermo Scientific Heraeus Megafuge 8. Una bomba de succión, un filtro de porcelana, y un filtro de papel de Whatman de 110 mm de diámetro. Equipo Soxhlet P-Selecta Uniplac de placas circulares 6002316 para la extracción de lípidos. Para pesar se utilizó una Balanza de precisión de 0.0001g "Excellence Analytical Balances" modelo XS-204 de METTLER TOLEDO. Todos los solventes utilizados eran de grado HPLC con pureza $>99.5\%$.

2.2. Cepas y medio de cultivo

Se empleó biomasa algal de diferentes familias de microalgas provenientes del proyecto VLIR Plantas Medicinales de la Universidad de Cuenca, en donde se realizó un proceso de aislamiento de diferentes cepas de microalgas. Dos familias fueron identificadas: *Chlorella* y *Scenedesmus*, procedentes de las lagunas de maduración de la PTAR ubicada en el sector Ucubamba de la ciudad de Cuenca. Tres familias de microalgas provenientes de diferentes embalses no pudieron ser identificadas pero, de acuerdo al proyecto, fueron clasificadas como cianobacterias; para que estas pudieran ser aisladas, se asignó los siguientes nombres genéricos: H1, proveniente del Parque Nacional "El Cajas", y, FF.Especie 1 y FF.Especie 3, provenientes del sector La Josefina, en el río Paute, provincia del Azuay.

Se controló las condiciones de cultivo proporcionando luz artificial, con ciclos alternados de una hora luz y una hora oscuridad. Se controló que las algas no se sedimenten y adhieran a las paredes de los reactores mediante agitadores magnéticos a una velocidad de 150 rpm. Se adicionó oxígeno al reactor, con un compresor tipo pecera en el cual se conectó la manguera de diámetro 1/4", y, al final de esta, el difusor de aire. Se monitoreó la medida de pH utilizando un pH metro YSI MultiLab IDS 4010-2. Cuando los valores de pH sobrepasaban el rango óptimo, éste se controló mediante la adición de pulsos de CO_2 . Si el pH del cultivo estaba por debajo del rango óptimo, éste se reguló con la adición de bicarbonato. Se cultivaron en un medio comprendido por bicarbonato de Sodio NaHCO_3 y abono completo que contiene: 12% de Nitrógeno, 12% Fósforo, 17% de Potasio, 2% de Magnesio y otros micronutrientes incluyendo pulsos de dióxido de carbono proporcionando una concentración de 0.1 g l^{-1} de NPK y 0.07 g l^{-1} de bicarbonato. Se experimentó una segunda etapa de cultivo durante tres semanas en la que se sometió a las familias *Chlorella* y *Scenedesmus* a condiciones de estrés con un suministro de nutrientes igual a la mitad de la concentración utilizada en condiciones ideales de crecimiento. Estas concentraciones de nutrientes fueron de 0.05 g l^{-1} de NPK y 0.07 g l^{-1} de bicarbonato. La biomasa húmeda se cosechó de los fotobioreactores, se centrifugó a una velocidad de rotación de 4000 rpm, se filtró y se secó al horno a una temperatura de 37°C durante aproximadamente 24 h. Se obtuvieron escamas secas de biomasa y se pulverizó utilizando un mortero de porcelana.

Al final del proceso de extracción, que normalmente dura unas pocas horas, el balón de ebullición con el lípido extraído es removido, el disolvente evaporado y la masa remanente del lípido extraído es medida (Ramluckan, Moodley, & Bux, 2014).

2.3. Experimentación

Todos los análisis se realizaron por duplicado con 1 g de muestra de biomasa microalgal seca y pulverizada, se pesó con precisión en un cartucho de extracción. El cartucho con la muestra fue transferida a la cámara de extracción en el aparato Soxhlet. El solvente fue colocado en la cámara de extracción teniendo en cuenta que su volumen sea capaz de alcanzar un sifonamiento en el extractor, se utilizó una cantidad de 150 ml del solvente y se colocó en las placas de calefacción. Se abrió el suministro de agua de refrigeración a los condensadores para asegurar un continuo reciclaje del solvente. Según Ramluckan *et al.* (2014) se recomienda que la extracción se realice a la temperatura de ebullición de los solventes. Las temperaturas del punto de ebullición se programaron

utilizando puntos de ebullición de los solventes mostrados en la Tabla 1. El equipo Soxhlet usado en este proyecto contiene un dial como indicador relativo de temperatura. En el manual se menciona que las placas circulares calefactoras están diseñadas para trabajar hasta una temperatura máxima de 400°C. Debido a que no se conoce a que temperatura correspondía cada nivel del indicador, esta se determinó utilizando un termómetro infrarrojo. Por lo tanto, se colocó el indicador de temperatura en el nivel 7 para los casos en los que se utilizaron solventes con puntos de ebullición altos, como el etanol, y un nivel tres o cuatro cuando se utilizaron solventes con puntos de ebullición bajos como la acetona y éter dietílico (datos no mostrados). Las extracciones se llevaron a cabo en forma sucesiva por la recirculación del solvente, donde los lípidos extraídos permanecieron en el fondo del balón de ebullición. Se finalizó la extracción cuando el solvente recuperó su color inicial (transparente) dentro de la cámara de extracción, apreciándose en forma visual. Terminado el proceso de extracción de lípidos y recuperación de solvente, se extrajo el balón de ebullición de 500ml de capacidad con los lípidos extraídos; este balón fue pesado previo a la extracción (vacío). El solvente se eliminó por evaporación en una estufa durante una hora y a una temperatura de 110°C. Los balones de ebullición se transfirieron a continuación a un desecador hasta que se enfrió durante aproximadamente 30 minutos y, a continuación, se volvió a pesar en la balanza analítica para obtener el peso seco del balón de ebullición más contenido de lípido algal. Se utilizó el Hexano como blanco para establecer la línea base para el rango en el que se hicieron mediciones.

Seis solventes fueron utilizados para la extracción **Tabla 1**. Propiedades relevantes de los solventes usados (Ramluckan *et al.*, 2014). (Tabla 1). La metodología de extracción utilizada consistió en solventes individuales y mezclas binarias de solventes, utilizando los mismos protocolos de extracción utilizados para la extracción con solventes individuales. Las diferentes extracciones para las familias *Chlorella* y *Scenedesmus* en cuanto al uso de solventes individuales se realizaron usando solo cloroformo, etanol, n-hexano y éter dietílico. En cuanto a las combinaciones binarias realizadas fueron, cloroformo:metanol (1:2), metanol:n-hexano (1:3), cloroformo:etanol (1:3), etanol:hexano (1:3), cloroformo:etanol (1:1), éter dietílico:etanol (1:1), cloroformo:hexano (1:2) y, por último, hexano:acetona (1:1). Para efectos de optimizar los procesos experimentales y los recursos, se realizó la extracción utilizando los solventes mencionados en una primera etapa, pero únicamente con las especies *Chlorella* y *Scenedesmus*. El análisis de los resultados, en esta primera etapa, sirvió para seleccionar las 4 diferentes combinaciones de solventes que dieron los mejores resultados (mayores concentraciones lipídicas) en las especies estudiadas. Para las especies, F.F. Especie 1, F.F. Especie 3 y H1 se realizaron las extracciones con las combinaciones de solventes seleccionadas con los mejores resultados en la etapa previa.

La segunda etapa de cultivo duró tres semanas. Durante este tiempo se sometió a las familias *Chlorella* y *Scenedesmus* a condiciones de estrés, provocado por la disminución de nutrientes en el cultivo, específicamente a través de un suministro de nutrientes igual a la mitad de la concentración utilizada en condiciones ideales de crecimiento, esto, con el fin de incrementar la productividad lipídica usando la combinación binaria de

solventes cloroformo: metanol (1:2) y utilizando el mismo protocolo de extracción.

Tabla 1. Propiedades relevantes de los solventes usados (Ramluckan *et al.*, 2014).

Solvente	Índice de polaridad	Punto de ebullición (°C)	Densidad a 25°C (g mL ⁻¹)
Hexano	0.1	69.0	0.659
Éter Dietílico	2.8	34.6	0.706
Cloroformo	4.1	60.5-61.5	1.492
Acetona	5.1	56.0	0.791
Metanol	5.1	64.7	0.792
Etanol	5.2	78.0	0.789
Agua (solo para comparación)	10.2	100.0	1.000

Se realizaron pretratamientos de biomasa algal con muestras de la familia *Chlorella* con el fin de obtener una mayor productividad de lípido más clorofila. En la Tabla 2 se observan los resultados de pretratar la biomasa algal en el autoclave y en el liofilizador. El proceso de liofilización duró alrededor de 24 horas. Para este procedimiento se usó un Liofilizador LABCONCO FreeZone de 2.5 litros con una plataforma de 12 puertos. Para el autoclavado se sometió a la biomasa algal seca sin triturar durante 30 min, a una presión de 100 MPa y a 100°C, en un autoclave marca Trident modelo EA-632, colocándose previamente la muestra en una caja Petri (envuelta en papel aluminio y papel vegetal). Para la extracción se utilizó la combinación binaria de solventes cloroformo: metanol (1:2) utilizando el mismo protocolo de extracción.

2.4. Cálculo de las cantidades de lípido y clorofila

La masa total de lípidos extraído (P_l) se determinó a partir de la diferencia de la masa del balón de ebullición antes y después de la extracción. El valor se expresó como un porcentaje de la masa original de biomasa pesada (P_v). La cantidad de extracto de lípidos extraídos en la muestra se calculó utilizando la siguiente fórmula general:

% de lípido extraído + clorofila =

$$\frac{P_l - P_v}{\text{peso de muestra algal seca}} * 100$$

dónde:

P_l : Peso del balón de ebullición más lípido algal y clorofila.

P_v : Peso del balón de ebullición vacío

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Porcentajes de lípido extraído de diferentes familias

Para la familia *Chlorella*, los resultados (Fig. 2) muestran el promedio de los análisis duplicados realizados con cada solvente y combinación binaria de éstos, también se incluye el error relativo. Los valores más altos (>16%) de

lípidos extraídos fueron alcanzados con la mezcla binaria cloroformo:metanol (1:2), metanol:hexano (1:3), etanol y cloroformo:etanol (1:3), con un tiempo de extracción promedio de 4 h 30 min. Los solventes restantes arrojaron porcentajes de lípidos extraídos entre 5 y 15%.

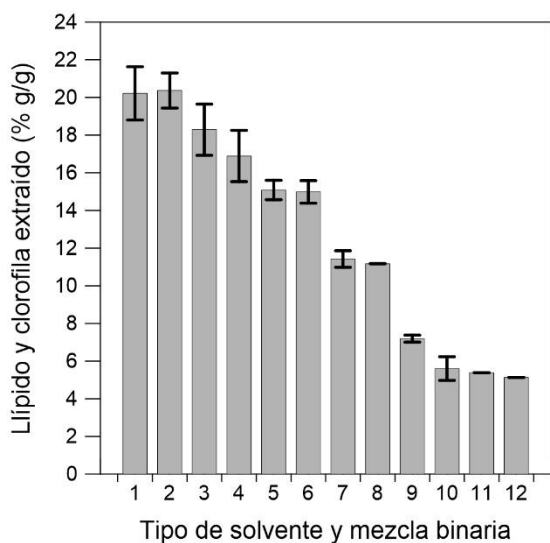


Figura 2. Porcentaje de lípidos y clorofila extraído por el método Soxhlet utilizando, solventes individuales y mezclas binarias para la familia Chlorella [1 = Cloroformo: Metanol (1:2); 2 = Metanol:Hexano (1:3); 3 = Etanol; 4 = Cloroformo:Etanol (1:3); 5 = Etanol:Hexano (1:3); 6 = Cloroformo:Etanol (1:1); 7 = Cloroformo; 8 = Éter Dietílico:Etanol (1:1); 9 = Cloroformo:Hexano (1:2); 10 = Hexano; 11 = Éter Dietílico; 12 = Hexano:Acetona (1:1)].

Basado en el principio de extracción, donde lo “*semejante disuelve lo semejante*”, el alto porcentaje de lípidos obtenido con la mezcla cloroformo:etanol (1:3) indicó que la especie Chlorella contiene cantidades de lípidos polares y neutros. Cuando en las extracciones se utilizó un solvente con etanol, el porcentaje fue superior al 18%, mientras que con cloroformo, este porcentaje fue mayor al 11%. Cuando se compararon estos con el valor obtenido usando la mezcla binaria cloroformo:etanol (1:3) el porcentaje de lípidos fue mayor al 14% lo cual indica que la combinación de solventes mejora la eficiencia de un solvente individual que, generalmente, extrae un porcentaje de lípidos menor. La mejor eficiencia de extracción fue producida por la mezcla metanol:hexano (1:3), con un porcentaje de lípidos de 20.37%, presentando una mínima diferencia con la mezcla cloroformo:metanol (1:2), con un porcentaje del 20.22%.

El porcentaje de lípidos extraído con éter dietílico fue de 5.38%, al ser este un solvente no polar los lípidos obtenidos en su mayoría no fueron apolares. Cabe mencionar que, al utilizar este solvente, se tuvieron ciertos inconvenientes debido a su alta volatilidad ya que, durante la extracción, se evaporó gran cantidad de éste. Esto impidió el sifonamiento del mismo en la cámara de extracción por lo que se tuvo que continuamente agregar una cantidad adicional de solvente en la cámara de extracción. Su olor característico y toxicidad impidió que éste se pueda usar para la familia Scenedesmus.

Para la familia Scenedesmus, los resultados de porcentajes de lípidos más clorofila y su valor relativo se ilustran en la Figura 3. Los valores más altos (>17%) de lípidos extraídos fueron alcanzados con las mezclas binarias cloroformo:metanol (1:2), metanol:hexano (1:3), etanol y cloroformo:etanol (1:3), con un tiempo de extracción promedio de 4h 50min. Los porcentajes de lípidos obtenidos con las mezclas metanol:hexano (1:3), etanol y cloroformo:etanol (1:3) no evidenciaron una gran variabilidad en sus valores, los cuales fueron de 17.95%, 16.86 y 17.59%, respectivamente. El porcentaje más bajo de extracción fue con el solvente n-hexano, con un valor de 7.04%.

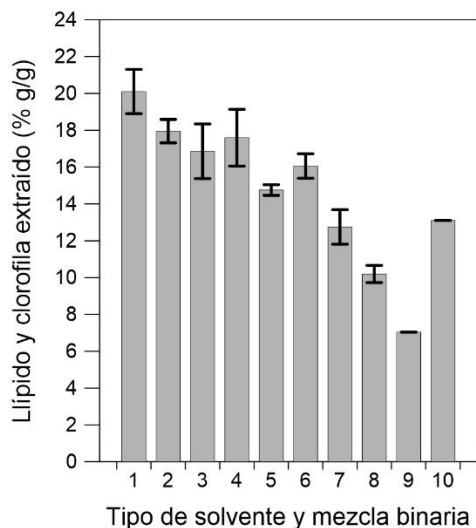


Figura 3. Porcentaje de lípidos y clorofila extraído por el método Soxhlet utilizando, solventes individuales y mezclas binarias para la familia Scenedesmus [1 = Cloroformo:Metanol (1,2); 2 = Metanol:Hexano (1:3); 3 = Etanol; 4 = Cloroformo:Etanol (1:3); 5 = Etanol:Hexano (1:3); 6 = Cloroformo:Etanol (1:1); 7 = Cloroformo; 8 = Cloroformo:hexano (1:2); 9 = Hexano; 10 = Hexano:Acetona (1:1)].

Para la familia F.F. Especie 3 se evidenció que el valor más alto de porcentaje de lípidos extraídos más clorofila fue con la mezcla metanol:hexano (1:3) de 19.17%, seguido por un 18.31% de la mezcla cloroformo:metanol (1:2). Con el solvente etanol se obtuvo 13.53% de lípidos más clorofila y con la mezcla cloroformo:etanol (1:3) un valor de 12.69% (Fig. 4). Las dos primeras mezclas no presentaron una mayor variación en el porcentaje de lípidos más clorofila extraída, por lo que, para esta especie, cualquiera de estas pudo ser elegida como la más eficiente en la extracción de lípidos.

Para la familia F.F. Especie 1, el valor más alto de porcentaje de lípidos más clorofila extraído fue con la mezcla cloroformo:metanol (1:2) de 17.69%; mientras que con la mezcla metanol:hexano (1:3) el valor fue de 13.96%. La extracción realizada con etanol resultó en un 9.23% de lípidos más clorofila. La mezcla cloroformo:etanol (1:3) dio el valor más bajo, resultando de 5.77% (Fig. 5).

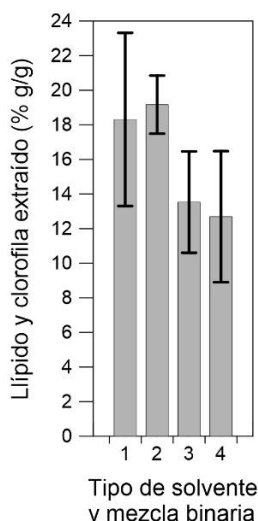


Figura 4. Porcentaje de lípido y clorofila extraído por el método Soxhlet utilizando, solventes individuales y mezclas binarias para la familia F.F. Especie 3.

[1 = Cloroformo: Metanol (1:2); 2 = Metanol:Hexano (1:3); 3 = Etanol; 4 = Cloroformo:Etanol (1:3)]

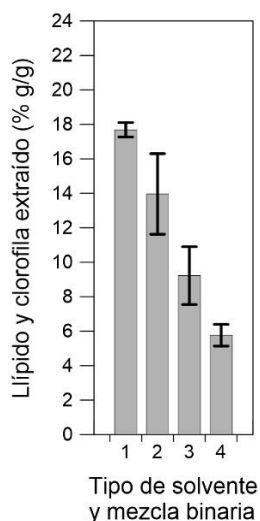


Figura 5. Porcentaje de lípido y clorofila extraído por el método Soxhlet utilizando, solventes individuales y mezclas binarias para la familia F.F. Especie 1.

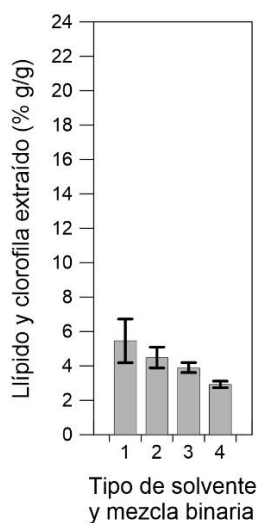


Figura 6. Porcentaje de lípido y clorofila extraído por el método Soxhlet utilizando, solventes individuales y mezclas binarias para la familia H1 [1 = Cloroformo: Metanol (1:2); 2 = Metanol:Hexano (1:3); 3 = Etanol; 4 = Cloroformo:Etanol (1:3)].

Para la familia H1, el valor más alto de porcentaje de lípido extraído más clorofila fue con la mezcla cloroformo:metanol (1:2) de 5.46%, mientras que con la mezcla metanol:hexano (1:3) fue de 4.49%. La extracción realizada con etanol fue de 3.91% de lípido más clorofila. La mezcla cloroformo:etanol (1:3) dio el valor más bajo 2.92% (Fig. 6). Se puede observar que, para esta especie, todos los valores de porcentaje de lípido más clorofila fueron relativamente bajos.

3.2. Productividad de lípidos bajo diferentes condiciones de nutrientes

Para las familias de *Chlorella* y *Scenedesmus*, la Tabla 2 muestra los resultados de la extracción de lípido más clorofila, en las dos etapas de cultivo.

Tabla 2. Porcentaje de lípido más clorofila en la primera y segunda etapa de cultivo con diferentes condiciones de cultivo para las familias *Chlorella* y *Scenedesmus*.

Etapas de cultivo	Familias de microalgas	
	<i>Chlorella</i> [Lípido + clorofila (%)]	<i>Scenedesmus</i> [Lípido + clorofila (%)]
1ra etapa	20.22	20.10
2da etapa	22.46	23.17

1ra etapa: 0.07 g l⁻¹ de bicarbonato; 0.1 g l⁻¹ de nutrientes

2da etapa: 0.07 g l⁻¹ de bicarbonato; 0.05 g l⁻¹ de nutrientes

Combinación de solventes usada para la extracción de lípido: cloroformo:metanol (1:2)

Se puede observar que los porcentajes en la segunda etapa de cultivo (condiciones de estrés) son mayores. Sin embargo, la diferencia respecto a las condiciones con un suministro normal de nutrientes no es significativa. Sería necesario realizar nuevas experimentaciones sometiendo a los cultivos a concentraciones de nutrientes mucho menores para lograr que la productividad de lípidos aumente significativamente.

3.3. Porcentaje de lípidos bajo condiciones de pretratamiento

En la Tabla 3 se observan los resultados de pretratar la biomasa algal en el autoclave y en el liofilizador.

Tabla 3. Porcentajes de lípido más clorofila, obtenido con pretratamientos de ruptura celular térmico y mecánico.

Familia de microalga	
<i>Chlorella</i> [Lípido + clorofila (%)]	
Biomasa sin pretratar	20.22
* Biomasa con pretratamiento de ruptura celular térmico	20.46
Biomasa con pretratamiento de liofilización	23.65

* Realizado con autoclave por 30 min (100°C y 100 MPa)

Condiciones del cultivo (1ra etapa): 0.07 g l⁻¹ de bicarbonato; 0.1 g l⁻¹ de nutrientes

Combinación de solventes usada para la extracción de lípido: cloroformo:metanol (1:2)

Se puede observar que el porcentaje de aumento de productividad cuando se sometió al autoclave fue prácticamente nulo debido a que sólo aumentó 0.24%. En fuentes bibliográficas revisadas se menciona que la biomasa algal debe permanecer en el autoclave en un tiempo óptimo de 1 a 3 horas. Por la gran energía requerida para el encendido del autoclave del laboratorio de Sanitaria de la Facultad de Ingeniería, la biomasa algal fue sometida al autoclave durante únicamente 30 minutos, resultando en un mínimo aumento del porcentaje mostrado.

En cuanto a la liofilización, los resultados muestran un aumento del 3.43%, consideramos que este aumento no es eficiente, debido a las grandes cantidades de energía que

son requeridas para este proceso, representando un gasto energético innecesario.

A futuro, es necesario analizar, en forma cuantitativa, la energía empleada en cada una de estas técnicas de disrupción celular. Esto, con el propósito de realizar una comparación del balance energético total de la producción de lípidos bajo las condiciones experimentadas en la presente investigación.

4. CONCLUSIÓN

El rendimiento más alto de lípidos para las 5 familias de microalgas estudiadas fueron los siguientes: *Chlorella* obtuvo 20.37% y *F.F. Especie 3* obtuvo 19.17% con la mezcla metanol:hexano (1:3), *Scenedesmus* obtuvo 20.10%, *F.F. Especie 1* obtuvo 17.69% y *H1* obtuvo 5.46%, con la mezcla cloroformo:metanol (1:2), de lípido más clorofila. Por esta razón se recomiendan estas dos mezclas como las más eficientes para la extracción de lípidos más clorofila.

Con los resultados obtenidos se puede concluir que la combinación de solventes mejora la eficiencia del solvente que individualmente extrae un porcentaje menor de lípidos. Combinaciones mayores no se recomiendan debido a que son poco prácticas e incrementarían el costo de la producción del biodiesel principalmente a grandes escalas. La familia *Chlorella* es la que mayor productividad de lípidos posee a diferencia de la familia *H1* que produce un promedio de 4.19% de lípidos más clorofila para todas las combinaciones de solventes que se realizaron.

Basado en el principio de extracción donde lo “semejante disuelve lo semejante” el alto porcentaje de lípido obtenido con la mezcla cloroformo:etanol (1:3) indicó que las familias *Chlorella* y *Scenedesmus* contienen cantidades de lípidos polares y neutros. El porcentaje de lípido extraído con éter dietílico fue de 5.38% en la familia *Chlorella*, al ser éste un solvente no polar los lípidos obtenidos en su mayoría no fueron apolares.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca por el financiamiento para la ejecución de la presente investigación.

REFERENCIAS

Abou-Shanab, R. A. I., Hwang, J. H., Cho, Y., Min, B., & Jeon, B. H. (2011). Characterization of microalgal species isolated from fresh water bodies as a potential source for biodiesel production. *Applied Energy*, 88(10), 3300-3306.

Alvarado, A., Vedantam, S., Goethals, P., & Nopens, I. (2012). A compartmental model to describe hydraulics in a full-scale waste stabilization pond. *Water Research*, 46(2), 521-530.

Amaro, H. M., Guedes, A. C., & Malcata, F. X. (2011). Advances and perspectives in using microalgae to produce biodiesel. *Applied Energy*, 88(10), 3402-3410.

Araujo, G. S., Matos, L. J., Fernandes, J. O., Cartaxo, S. J., Goncalves, L. R., Fernandes, F. A., & Farias, W. R. (2013). Extraction of lipids from microalgae by ultrasound application: prospection of the optimal extraction method. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(1), 95-98.

Arias Peñaranda, M. T., Martínez Roldán, A. D. J., & Cañizares Villanueva, R. O. (2013). Producción de biodiesel a partir de microalgas: Parámetros de cultivo que afectan la producción de lípidos. *Acta Biológica Colombiana*, 18(1). Disponible en <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=319028010004>

Brennan, L., & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae - A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 557-577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.009>

Cai, T., Park, S. Y., & Li, Y. (2013). Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: Status and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 360-369. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.030>

Chen, G., Zhao, L., & Qi, Y. (2015). Enhancing the productivity of microalgae cultivated in wastewater toward biofuel production: A critical review. *Applied Energy*, 137, 282-291. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.032>

Dragone, G. D., Fernandes, B. F., Vicente, A., & Teixeira, J. A. (2010). *Current research, technology and education topics*. In: Sánchez, M. D. P., Serrano, L., & Martínez, A. (2009). Biodiesel a partir de microalgas. *BioTecnología*, 13(3), 38-61.

González, A., Viatcheslav, K., & Guzmán, A. (2009). Desarrollo de métodos de extracción de aceite en la cadena de producción de biodiesel a partir de microalgas. *Prospective*, 7(2), 53-60.

Garibay, A., Vázquez-Duhalt, R., Sánchez, M.d.P., Serrano, L. and Martínez, A. (2009) Biodiesel a partir de microalgas. *BioTecnología*, 13(3), 38-61.

Grobbelaar, J. U. (2004). *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*. Richmond, A. (Ed), pp. 97-115. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.

Halim, R., Danquah, M. K., & Webley, P. A. (2012). Extraction of oil from microalgae for biodiesel production: A review. *Biotechnology Advances*, 30(3), 709-732.

Jonker, J. G. G., & Faaij, A. P. C. (2013). Techno-economic assessment of micro-algae as feedstock for renewable bio-energy production. *Applied Energy*, 102, 461-475.

Khan, M. I., Shin, J. H., & Kim, J. D. (2018). The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. *Microbial Cell Factories*, 17(36), 1-21. <https://doi.org/10.1186/s12934-018-0879-x>

- Lee, A. K., Lewis, D. M., & Ashman, P. J. (2012). Disruption of microalgal cells for the extraction of lipids for biofuels: Processes and specific energy requirements. *Biomass and Bioenergy*, 46, 89-101. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.06.034>
- Medipally, S. R., Yusoff, F. M., Banerjee, S., & Shariff, M. (2015). Microalgae as sustainable renewable energy feedstock for biofuel production. *BioMed Research International*, 2015, 13 pp. <https://doi.org/10.1155/2015/519513>
- Milano, J., Ong, H. C., Masjuki, H. H., Chong, W. T., Lam, M. K., Loh, P. K., & Vellayan, V. (2016). Microalgae biofuels as an alternative to fossil fuel for power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 180-197. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.150>
- Milledge, J. J. (2011). Commercial application of microalgae other than as biofuels: a brief review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 10(1), 31-41. <https://doi.org/10.1007/s11157-010-9214-7>
- Quinn, J. C., & Davis, R. (2015). The potentials and challenges of algae-based biofuels: A review of the techno-economic, life cycle, and resource assessment modeling. *Bioresource Technology*, 184, 444-452. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.075>
- Raja, R., Shanmugam, H., Ganesan, V., & Carvalho, I. S. (2014). Biomass from Microalgae: An Overview. *Journal of Oceanography and Marine Research*, 2(1), 1-7. <https://doi.org/10.4172/2332-2632.1000118>
- Ramluckan, K., Moodley, K.G., & Bux, F. (2014). An evaluation of the efficacy of using selected solvents for the extraction of lipids from algal biomass by the soxhlet extraction method. *Fuel*, 116, 103-108.
- Sathish, A., & Sims, R. C. (2012). Biodiesel production from mixed culture algae via a wet lipid extraction procedure. *Bioreource Technology*, 118, 643-647. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.118>
- Sutherland, D. L., Turnbull, M. H., Broady, P. A., & Craggs R. J. (2014). Effects of two different nutrient loads on microalgal production, nutrient removal and photosynthetic efficiency in pilot-scale wastewater high rate algal ponds. *Water Research*, 1(11), 53-62.
- Sutherland, D. L., Howard-Williams, C., Turnbull, M. H., Broady, P. A., & Craggs, R. J. (2014). Enhancing microalgal photosynthesis and productivity in wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresource Technology*, 184, 222-229.
- Taher, H., Al-Zuhair, S., Al-Marzouqi, A. H., Haik, Y., & Farid, M. (2014). Effective extraction of microalgae lipids from wet biomass for biodiesel production. *Biomass and Bioenergy*, 66(0), 159-167.



Niveles de cadmio en atún fresco y enlatado para consumo humano en Ecuador



Evelyn Flores, Wilson Pozo , Beatriz Pernía , Williams Sánchez

Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Guayaquil, Av. Raúl Gómez Lince s/n y Av. Juan Tanka Marengo, Guayaquil, Ecuador, C.P. 090150.

Autor para correspondencia: wilson.pozog@ug.edu.ec

Fecha de recepción: 2 de noviembre de 2018 - Fecha de aceptación: 6 de diciembre de 2018

RESUMEN

Actualmente, la bioacumulación de cadmio (Cd) en peces está aumentando y es un motivo de preocupación debido a su toxicidad. Por esto, el objetivo de esta investigación fue determinar la concentración de cadmio en 36 muestras de atún fresco y enlatado, provenientes de los mercados Caraguay, Puerto Pesquero Santa Rosa (PPSR) y atún enlatado de consumo nacional y de exportación. Para cuantificar la concentración de cadmio, las muestras de atún recolectadas fueron analizadas mediante el método de espectrofotometría de absorción atómica. Los niveles de concentración de cadmio de las muestras analizadas fueron comparados con la norma nacional NTE INEN 183 y 184, y con el Reglamento de la Unión Europea No 488/2014, cuyo límite máximo permitido es de 0.10 ppm Cd. En atún enlatado de consumo nacional se encontraron concentraciones de 0.441 ± 0.046 ppm Cd y en atún de exportación 0.297 ± 0.109 ppm Cd; sin embargo, las diferencias no fueron estadísticamente significativas ($p > 0.05$). De igual forma, las concentraciones en atún fresco de la especie *Katsuwonus pelamis* fue de 0.385 ± 0.174 ppm Cd, y de *Thunnus albacares* 0.295 ± 0.187 ppm Cd en el mercado de Caraguay. Por el contrario, las concentraciones de Cd en atún proveniente del PPSR fueron mucho menores: 0.079 ± 0.061 ppm Cd y 0.030 ± 0.050 para *Katsuwonus pelamis* y *Thunnus albacares*, respectivamente. No hubo diferencias significativas entre el atún enlatado y fresco ($p > 0.05$). El 66% de las muestras analizadas superaron los límites permisibles de Cd de las normas nacionales e internacionales, por lo que se recomienda mantener una vigilancia sanitaria permanente del atún en el Ecuador.

Palabras claves: Atún, Cadmio, *Katsuwonus*, *Thunnus*, espectrofotometría de absorción atómica.

ABSTRACT

Currently, cadmium bioaccumulation in fish is increasing and is a concern due to toxicity. This research is intended to define the Cadmium concentration in 36 samples of fresh tuna and canning, respectively from the Caraguay Market in the city of Guayaquil, the fishing port Santa Rosa (PPSR), and canned tuna for national consumption and export. The cadmium concentration in the tissue of the collected tuna samples was analyzed by atomic absorption spectrophotometry. Levels of cadmium concentration in the analyzed samples were compared to the national regulation norm NTE INEN 183 and 184, and the European Union regulation norm No 488/2014. According to those norms the maximum permissible cadmium content in foodstuff might not exceed 0.10 ppm Cd. In canned tuna for national consumption we found concentrations of 0.441 ± 0.046 ppm Cd and in the canned tuna for export the cadmium level varied around 0.297 ± 0.109 ppm; differences were however not statistically significant ($p > 0.05$). Similarly, the Cd concentrations in fresh tuna of the species *Katsuwonus pelamis* was 0.385 ± 0.174 ppm and of the species *Thunnus albacares* 0.295 ± 0.187 ppm in the market of Caraguay. In contrast, Cd concentrations in tuna from the PPSR were much lower: 0.079 ± 0.061 ppm Cd and 0.030 ± 0.050 for *Katsuwonus pelamis* and *Thunnus albacares*, respectively. 66% of the analyzed samples exceeded the permissible limits of Cd according national and international standards. It is recommended to maintain a permanent health surveillance of tuna in Ecuador.

Keywords: Tuna, Cadmium, *Katsuwonus*, *Thunnus*, atomic absorption spectrophotometry.

1. INTRODUCCIÓN

Una vez terminada la segunda guerra mundial se originó un aumento en el consumo de atún, debido a que este recurso es accesible y rico en proteínas y minerales. La alta demanda hizo que la industria del atún se tecnifique, tanto en el arte de la pesca como en su procesamiento, de tal manera que en la actualidad su captura, para el consumo mundial, es en miles de toneladas al año. Sin embargo, los indiscutibles beneficios derivados del consumo de atún pueden ser opacados por la presencia en su carne de metales tóxicos, como cadmio (Cd), plomo (Pb) y mercurio (Hg), a menudo

en niveles superiores a las normas de seguridad establecidas por la legislación de los distintos países (Storelli, Barone, Cuttone, Giungato, & Garofalo, 2010).

Dentro de los metales pesados el Cd es un metal altamente tóxico y no esencial, obtenido como subproducto del tratamiento metalúrgico del zinc y del plomo que, junto con otras actividades industriales tales como el uso de fertilizantes, galvanizantes, pigmentos y baterías de níquel-cadmio, constituyen importantes fuentes de contaminación ambiental (Pernía, De Sousa, Reyes, & Castrillo, 2008). Generalmente, se encuentra en el ambiente en bajas concentraciones, pero la actividad



humana ha aumentado considerablemente esos niveles. El cadmio puede desplazarse a gran distancia desde la fuente de emisión por transferencia atmosférica y se acumula fácilmente en muchos organismos, especialmente en peces, moluscos y crustáceos (OMS, 2010). El Cd se halla presente en el medio acuático como consecuencia de fenómenos naturales, como el vulcanismo marino, o de fenómenos geológicos y geotérmicos, pero también se derivan de la contaminación causada por la metalurgia y explotación minera intensivas, la evacuación de residuos y la incineración, así como la lluvia ácida provocada por la contaminación industrial (FAO, 1989).

La considerable acumulación de Cd podría incidir en disfunción renal, daños en el esqueleto y deficiencia reproductiva (Cope, Leidy, & Hodgson, 2004). Se ha descrito que el Cd afecta los riñones, pulmones, esqueleto, testículos y sistema nervioso central de los animales y humanos, generando hipocalcemia, diabetes, osteoporosis y cáncer (Burger, 2008; Clemens, Aarts, Thomine, & Verbruggen, 2013). Los peces tienen la capacidad de almacenar en su organismo una concentración mayor de metales que la presente en el medio, por lo que son indicadores importantes de la contaminación, pero también esto implica que su consumo se puede convertir en un problema de salud para las poblaciones que se alimentan de este recurso (Suhaimi, Wong, Lee, & Low, 2005; Moncayo, Trejos, Maridueña & Castro, 2010).

Las especies de atún son organismos pelágicos de alto rendimiento, con altas tasas de metabolismo y consumo de alimentos, lo que los expone a elementos traza (Kojadinovic, Potier, Le Corre, Cosson, & Bustamante, 2007). Por consiguiente, se pueden generar efectos adversos para la salud humana si este pez se consume con demasiada frecuencia o en grandes cantidades. En este contexto, también se debe considerar el atún enlatado puesto que, entre los productos pesqueros en conserva, son sin duda los más importantes y frecuentemente consumidos (Storelli *et al.*, 2010). El atún en conserva es, de hecho, muy consumido a nivel mundial y asequible para la mayoría de las familias trabajadoras. Existen evidencias de contaminación por Hg y Cd en atún del Golfo Pérsico (Ganjavi, Ezzatpanah, Givianrad, & Shams, 2010), Granada, España (Olmedo, Hernández, Barbier, Ayouni, & Gil, 2013) y del Océano Atlántico e Índico (Chen *et al.*, 2018). En Ecuador se ha registrado contaminación por Cd en atún de Manta, en la provincia de Manabí (Araujo *et al.*, 2016).

La evaluación del contenido de metales pesados en peces es primordial por sus efectos sobre la salud humana. Según Senior, Cornejo-Rodríguez, Tobar, Ramírez-Muñoz, & Márquez (2016), la información sobre el contenido de metales en peces de elevado consumo en el Ecuador es insuficiente y señalan que esta información es importante para la toma de decisiones para la protección de los consumidores y la inocuidad alimentaria. Es por ello que el objetivo del presente trabajo fue detectar la presencia de Cd en muestras de atún enlatado y fresco, de consumo nacional y de exportación, para compararlo con los límites máximos permisibles según las normas ecuatorianas NTE INEN 183 y 184 y las del Reglamento de la Unión Europea (UE) No 488/2014. El estudio examinó los niveles de Cd del atún fresco y enlatado para consumo humano en Guayaquil y en el Puerto Pesquero Santa Rosa (PPSR) y su área de influencia. Los presentes resultados sirven para concientizar a la ciudadanía sobre el cuidado del ambiente

y de los alimentos que se consumen en los hogares ecuatorianos.

2. METODOLOGÍA

2.1. Área de estudio

Las muestras de atún fresco se colectaron en el PPSR en la provincia de Santa Elena, Ecuador (2°12'39.95"S y 80°56'53.98"O), principal puerto que abastece de productos marinos a los habitantes de Guayaquil, y en el Mercado Municipal "Caraguay" en la ciudad de Guayaquil, Ecuador (2°13'35.44"S y 79°53'14.18"O). Por otro lado, el atún enlatado se obtuvo de manera aleatoria de diferentes marcas nacionales y de exportación, en diferentes supermercados de la ciudad de Guayaquil. Las especies de atún fresco que se recolectaron fueron *Thunnus albacares* (Bonnaterre, 1788) y *Katsuwonus pelamis* (Linnaeus, 1758).

2.2. Muestreo

Se recolectaron 12 muestras de músculo de atún fresco en el PPSR en la provincia de Santa Elena y 12 en el Mercado Municipal "Caraguay" en la ciudad de Guayaquil, así mismo se tomaron 6 muestras de atún enlatado de diferentes marcas en varios supermercados de distintos sectores de la ciudad de Guayaquil y 6 de atún enlatado para exportación.

2.3. Análisis de laboratorio

Una vez recolectadas las muestras se procedió a su traslado al laboratorio en fundas herméticas a 4°C. Una vez en el laboratorio, las muestras del tejido muscular fueron pesadas en una balanza Sartorius (modelo BL210S). Posteriormente, un gramo de atún fue digerido utilizando HNO₃ (Merck) al 60% y calentadas a 60°C en una plancha de calentamiento, filtradas con papel Whatman N°40 y enrazadas a 50 mL en un balón aforado. Las muestras fueron analizadas en un Espectrofotómetro de absorción atómica de llama Perkin Elmer (modelo AAnalyst 100), usando la metodología interna del laboratorio del IIRN basada en metodología descrita en Standard Methods (2005). Para generar las curvas de calibración se utilizaron estándares comerciales de Cd (AccuStandard). Las muestras se leyeron a 228.8 nm para el Cd, con un límite de detección de 0.002 ppm. Todas las mediciones se realizaron por triplicado (n=3).

2.4. Análisis estadísticos

Se determinó la normalidad de los datos utilizando una prueba de Anderson-Darling y homocedasticidad mediante un test de Levene. Para comparar las medias de las concentraciones de Cd en atún nacional vs de exportación, y de atún enlatado vs fresco, se aplicó un ANOVA de una vía, tomando p<0.05 como valor significativo y un test a posteriori de Tukey. Para determinar la existencia de relaciones entre las variables peso y talla con las concentraciones de Cd en los atunes, se realizó un análisis de correlación de Pearson. Las pruebas estadísticas se realizaron utilizando el programa MINITAB versión 17.0.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De las 36 muestras de atún estudiadas el 66% superó los límites máximos permisibles según las normas NTE INEN 183, 184 y el Reglamento de la Unión Europea (UE) 488/2014, cuyo límite máximo permitido es de 0.10 ppm Cd. Los resultados indican que el contenido de cadmio en atún supera el límite máximo permisible de 2 a 5 veces, considerando el rango de concentraciones de 0.2 a 0.5 ppm Cd. Comparativamente, no existen diferencias estadísticamente significativas entre la concentración de Cd en tejidos de atún enlatado de consumo nacional y de exportación ($F=2.64$; $p=0.077$). De igual forma, no existen diferencias entre la concentración de este metal pesado en atún enlatado o fresco (Fig. 1 y Tabla 1). Por otro lado, existe una leve tendencia hacia una mayor acumulación de Cd en atún de consumo nacional (0.441 ± 0.046 ppm Cd) en comparación con el atún de exportación (0.297 ± 0.109 ppm Cd); sin embargo, las diferencias no fueron estadísticamente significativas ($p>0.05$). Por otro lado, las concentraciones en atún fresco de la especie *Katsuwonus pelamis* (0.385 ± 0.174 ppm Cd) parecieran ser mayores a las de la especie *Thunnus albacares* (0.295 ± 0.187 ppm Cd) pero tampoco existen diferencias significativas ($p>0.05$).

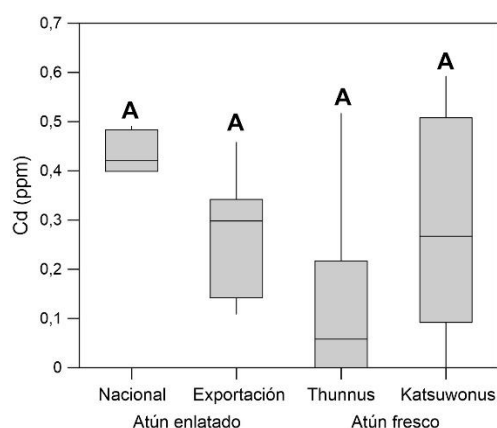


Figura 1. Comparación entre las concentraciones de Cd (ppm) en tejido de atún en las muestras obtenidas de enlatado y pescado fresco. Letras iguales señalan que no hay diferencias estadísticamente significativas entre las medias, según ANOVA de 1-vía ($p<0.05$) y test de Tukey.

Tabla 1. Contenidos de Cd en atún enlatado destinado por el mercado nacional e internacional.

Cd (ppm)	Muestras enlatadas	
	Mercado nacional	Exportación
Media	0.441	0.297
DS	0.046	0.109
Mín.	0.399	0.142
Máx.	0.491	0.458

En cuanto al sitio de expendio en el cual fueron obtenidas las muestras de atún fresco, sí existen diferencias en las concentraciones de Cd, sin importar la especie ($F=13.57$; $p=0.000$), siendo el Mercado de Caraguay el que presenta los mayores valores de Cd para ambas especies (Fig. 2 y Tabla 2). Según los resultados obtenidos, la concentración

de Cd no depende de la especie, sino del lugar donde fueron capturados. Los atunes de la especie *Thunnus albacares* del PPSR presentaron un valor promedio 0.030 ± 0.050 ppm Cd, sin embargo, se detectaron valores mínimos de 0.000 ppm Cd y máximos de 0.140 ppm Cd.

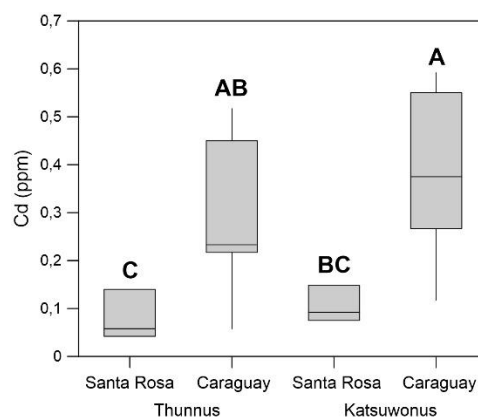


Figura 2. Comparación entre las concentraciones de Cd (ppm) en tejido de atún *Thunnus albacares* (Thunnus) y *Katsuwonus pelamis* (Katsuwonus) obtenido de los mercados Santa Rosa y Caraguay. Letras iguales señalan que no hay diferencias estadísticamente significativas entre las medias, según ANOVA de 1-vía ($p<0.05$) y test de Tukey.

Así mismo, en las muestras de la especie *Katsuwonus pelamis* se observó un promedio de 0.079 ± 0.061 ppm Cd, con una alta desviación estándar debido a que el Cd no fue detectable en 2 muestras con valores mínimos de 0.000 ppm Cd y máximo de 0.148 ppm Cd. Por otro lado, las muestras de las especies expendidas en el mercado Caraguay presentaron valores mucho mayores. Los atunes de la especie *Thunnus albacares* tenían niveles de Cd de 0.295 ± 0.187 ppm Cd, con un valor mínimo de 0.058 y máximo de 0.517 ppm Cd (Tabla 2). Por otro lado, la especie *Katsuwonus pelamis* registró un valor promedio de 0.385 ± 0.174 ppm Cd, con un valor mínimos de 0.2677 y máximo de 0.592 ppm Cd.

Las diferencias existentes en las concentraciones de Cd en el atún procedente del PPSR y del mercado Caraguay podría ser la procedencia de los peces. Al PPSR solo llegan los atunes capturados en las zonas aledañas al puerto mientras que el mercado Caraguay recibe las especies capturadas en la zona norte de la provincia de Guayas, de General Villamil y los puertos de la zona sur de la provincia de Manabí. Es conocido que la provincia de Guayas presenta contaminación por Cd en sus ríos, los cuales desembocan en el Golfo de Guayaquil, además de la contribución de contaminación del Estero Salado, proveniente de descargas industriales y domésticas (Pernía et al., 2018; Mero et al., 2019).

Los resultados del presente trabajo fueron mayores a los hallados en un estudio realizado por el Instituto Nacional de Pesca durante el período enero 2006 y julio 2009, quienes registraron en atún concentraciones de 0.10 a 0.26 ppm Cd (Moncayo et al., 2010). Este incremento en la concentración del metal pesado podría indicar que existe un mayor índice de contaminación en el sistema marino.

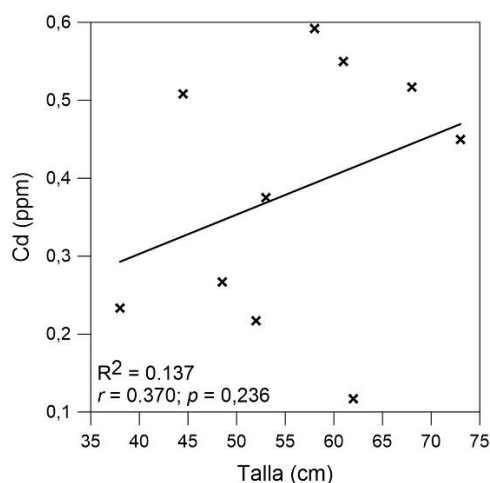
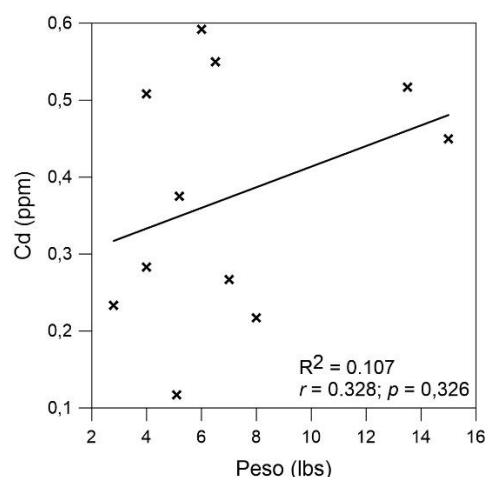
Tabla 2. Contenidos de Cd, talla y peso de atún fresco (*Thunnus albacares* y *Katsuwonus pelamis*) expendidos en los mercados Caraguay y Santa Rosa (PPRS).

Mercado	<i>Thunnus albacares</i>			<i>Katsuwonus pelamis</i>		
	Talla (cm)	Peso (lbs)	Cd (ppm)	Talla (cm)	Peso (lbs)	Cd (ppm)
Media	70.200	20.460	0.295	54.714	5.400	0.385
DS	31.068	24.264	0.187	6.467	1.168	0.174
Mín.	38.000	2.800	0.058	44.500	4.000	0.117
Máx.	120.000	63.000	0.517	62.000	7.000	0.592

Mercado	<i>Thunnus albacares</i>			<i>Katsuwonus pelamis</i>		
	Talla (cm)	Peso (lbs)	Cd (ppm)	Talla (cm)	Peso (lbs)	Cd (ppm)
Media	116.811	69.56	0.030	56.250	5.500	0.079
DS	46.90	41.12	0.050	7.089	0.891	0.061
Mín.	34.50	2.50	0.000	50.000	4.500	0.000
Máx.	146.00	100.00	0.140	65.000	6.300	0.148

Los presentes resultados muestran valores de Cd inferiores a los mencionados en otras zonas de Ecuador como Manta, donde Araujo & Cedeño-Macías (2016) detectaron 2.4 ppm en tejido muscular. Similarmente, los resultados fueron inferiores a los registrados en otras zonas tales como Golfo Pérsico 0.062 ppm Cd (Ganjavi *et al.*, 2010), Egipto 0.043 ppm Cd (Hussein & Khaled, 2014), Océano Atlántico 0.15 ppm, Océano Índico 0.22 ppm (Chen *et al.*, 2018) y Libia 0.32 ppm Cd (Voegborlo & El-Methnani, 1999). Además, el análisis de correlación lineal y de Pearson mostró que no existe correlación entre la concentración de Cd y la talla ($R^2=0.137$; $r=0.370$; $p=0.263$) o peso ($R^2=0.107$; $r=0.328$; $p=0.326$) de los peces (Figs. 3 y 4). Contrario a estos resultados, en la literatura se discute sobre la biomagnificación de los metales pesados y se asume que a mayor tamaño de un depredador mayor será su contenido de metales pesados. En el presente trabajo no se observó correlación entre el tamaño del animal y la concentración de Cd. Los ejemplares de menor tamaño de las especies *Katsuwonus pelamis* y *Thunnus albacares*, por ser individuos pequeños y al encontrarse desarrollando su ciclo de vida a pocos metros, o kilómetros, de la orilla del mar –que es la zona de pesca artesanal, tienden a acumular mayor cantidad de cadmio en el tejido muscular. Esto podría deberse a la contaminación existente en las ciudades cercanas y que llega desde los ríos con descargas y sedimentos; por otra parte, mediante los vientos, la atmósfera que trasporta las cenizas volcánicas emanadas en la cordillera andina, las mismas caen en los océanos, contaminando el sistema marino.

En los individuos de mayor peso y talla, de la especie *Thunnus albacares*, no se logró detectar niveles de cadmio visibles a través de la lectura del espectrofotómetro de absorción atómica. Creemos que esto debe al efecto de dilución de la contaminación en los océanos, los individuos de mayor tamaño prefieren mantenerse en aguas profundas a diferencia de las especies de menor tamaño que están más cerca de la orilla. Así mismo, es necesario mencionar que estas especies, por ser de sangre fría, realizan un proceso de detoxificación por un mecanismo celular que involucra un sistema de transporte de membrana el cual internaliza al metal pesado, presente en el entorno celular, con gasto de energía. Este consumo energético se genera a través del sistema H⁺-ATPasa. Una vez que el metal pesado es incorporado al citoplasma, éste es secuestrado por la presencia de proteínas ricas en grupos sulfhidrilos, llamadas metalotioneínas, o también puede

**Figura 3.** Análisis de correlación lineal entre la concentración de Cd en el atún del mercado de Caraguay (*Thunnus albacares* y *Kwatsuvonus pelamis*) y la talla del pez. R^2 representa la correlación lineal y r el valor de la prueba de Pearson.**Figura 4.** Análisis de correlación lineal entre la concentración de Cd en el atún del mercado de Caraguay (*Thunnus albacares* y *Kwatsuvonus pelamis*) y el peso de los peces. R^2 representa la correlación lineal y r el valor de la prueba de Pearson.

ser compartimentalizado para posteriormente ser expulsado por la orina.

La presencia de valores, por encima del límite permisible, de contenido de Cd, nos manifiesta cómo perturban los contaminantes al ecosistema marino y a sus organismos acuáticos. Por lo expuesto, las entidades gubernamentales involucradas deberían realizar monitoreos periódicos en muestras de atún para evitar que la población se contamine con Cd. En la costa ecuatoriana, el origen de la contaminación por Cd es principalmente de tipo geogénico, por la meteorización de la roca parental procedente de la Cordillera de los Andes y por aporte atmosférico (Pozo, Sanfeliu, & Carrera, 2011; Senior *et al.*, 2016). También se debe a la actividad antropogénica, entre estos: por acumulación de residuos industriales, actividad minera, quema de basura y residuos agrícolas, explotación de petróleo, uso indiscriminado de insumos químicos en la agricultura, vertidos de aguas domésticas e industriales sin tratamiento en la zona costera y a la escorrentía proveniente de las zonas de cultivos (Senior *et al.*, 2016). Sumado a ello, en zonas aledañas a los ríos que desembocan en la costa ecuatoriana se ha registrado la presencia de fábricas de plástico, pintura, baterías y metalmecánicas, reportadas como potenciales fuentes antropogénicas de Cd (Pernía, Mero, Cornejo, Ramírez, & Ramírez, 2018).

En base a los presentes resultados, son necesarios estudios actualizados sobre la presencia de metales pesados en la costa ecuatoriana. Más información sobre este tema permitirá dilucidar, por ejemplo, el comportamiento de los metales que están siendo biomagnificados en la cadena trófica. A nivel nacional, es escaso el conocimiento de esta problemática, generada por el vertido de cadmio y otros metales, en cuerpos de agua que tienen impacto sobre el recurso pesquero, el deterioro de los ecosistemas y la salud humana.

4. CONCLUSIONES

Se comprobó la hipótesis de que existe contaminación por cadmio en atún fresco y enlatado para consumo humano comercializado en la ciudad de Guayaquil y el Puerto Pesquero Santa Rosa. El 66% de las muestras analizadas de atún superaron límites permisibles establecidos en las Normas INEN y en el Reglamento 488/2014 de la Unión Europea. No se observaron diferencias significativas entre los niveles de Cd en el atún enlatado y el atún fresco, ni entre las especies *Katsuwonus pelamis* y *Thunnus albacares*, lo que implica que el consumidor de atún está expuesto a ingerir este metal pesado a través del consumo de atún, independientemente de su presentación. Sin embargo, la procedencia del atún si influye sobre las concentraciones del metal pesado, siendo mayores las concentraciones en peces provenientes del mercado Caraguay. Se efectuó un análisis comparativo de los resultados de las muestras de atún fresco y enlatado con estudios similares realizados en el Instituto Nacional de Pesca, demostrando que en el presente estudio realizado existe un incremento en la contaminación de Cd.

REFERENCIAS

- Araújo, C., & Cedeño-Macias, L. (2016). Heavy metals in yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and common dolphinfish (*Coryphaena hippurus*) landed on the Ecuadorian coast. *Science of the Total Environment*, 541, 149-154.
- Bonnaterre, P.-J. (1788). *Tableau encyclopédique et méthodique des trois regnes de la nature*. Paris. Recuperado de <https://www.biodiversitylibrary.org/item/44034>
- Burger, J. (2008). Assessment and management of risk to wildlife from cadmium. *Science of the Total Environment*, 389, 37-45.
- Chen, C. Y., Chen, Y. T., Chen, K. S., Hsu, C. C., Liu, L. L., Chen, H. S., Chen, M. H. (2018). Arsenic and five metal concentrations in the muscle tissue of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the Atlantic and Indian Oceans. *Marine Pollution Bulletin*, 129(1), 186-193.
- Clemens, S., Aarts, M. G. M., Thomine, S., & Verbruggen, N. (2013). Plant science: The key to preventing slow cadmium poisoning. *Trends in Plant Science*, 18(2), 92-99. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.08.003>
- Cope, G. W., Leidy, R. B., & Hodgson, E. (2004). *Classes of Toxicants: Use Classes (Chapt. 5)*. In: Hodgson, E. (Ed.). *A textbook of modern toxicology*. Hoboken, N.J: Wiley Interscience.
- FAO (1989). *Nutrición y alimentación de peces y camarones cultivados manual de capacitación 1. Nutrientes esenciales*. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/field/003/ab492s/ab492s04.htm>
- Ganjavi, M., Ezzatpanah, H., Givianrad, M., & Shams, A. (2010). Effect of canned tuna fish processing steps on lead and cadmium contents of Iranian tuna fish. *Food Chemistry*, 118(3), 525-528.
- Hussein, A., Khaled, A. (2014). Determination of metals in tuna species and bivalves from Alexandria, Egypt. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 40(1), 9-17.
- Kojadinovic, J., Potier, M., Le Corre, M., Cosson, R. P., & Bustamante, P. (2007). Bioaccumulation of trace elements in pelagic fish from the Western Indian Ocean. *Environmental Pollution*, 146(2), 548-566.
- Linnaeus, C. (1758). *Systema naturae per regna tria naturae: secundum classes, ordines, genera, species, cum characteribus, differentiis, synonymis, locis*. (10a ed., Vol. 1). Holmiae: Impensis Direct. Laurentii Salvii. Recuperado de <https://www.biodiversitylibrary.org/item/10277>
- Mero, M., Pernía, B., Ramírez-Prado, N., Bravo, K., Ramírez, L., Larreta, E. & Egas, F. (2019) Concentración de cadmio en agua, sedimentos, *Eichhornia crassipes* y *Pomacea canaliculata* en el río Guayas y sus afluentes. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(4) (aceptado).
- Moncayo, D., Trejos, R., Maridueña, A., & Castro, A. (2010). Niveles de mercurio, cadmio y plomo en productos pesqueros de exportación. *Revista Ciencias del Mar y Limnología*, 4(1).
- Norma NTE INEN 0184. (1990). *Conservas envasadas de atún*. Disponible en https://archive.org/stream/ec.nte.0184.1990/ec.nte.0184.1990_djvu.txt

- Olmedo, P., Hernández, A., Barbier, F., Ayouni, L., & Gil, F. (2013). Determination of toxic elements (mercury, cadmium, lead, tin and arsenic) in fish and shellfish samples. Risk assessment for the consumers. *Environment International*, 59, 63-72.
- OMS. (2010). *Hay que adoptar medidas sobre productos químicos que plantean un importante problema de salud pública*. Disponible en <http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/food-safety>
- Pernía, B., De Sousa, A., Reyes, R., Castrillo, M. (2008). Biomarkers of cadmium pollution in plants. *Interciencia*, 33(2), 112-119.
- Pernía, B., Mero, M., Cornejo, X., Ramírez, N., Ramírez, L. (2018). Determinación de cadmio y plomo en agua, sedimento y organismos bioindicadores en el Estero Salado, Ecuador. *Enfoque UTE*, 9(2), 89-105.
- Pozo, W., Sanfeliu, T., & Carrera, G. (2011). Metales pesados en humedales de arroz en la cuenca baja del río Guayas. *MASKANA*, 2(1), 17-30.
- Reglamento (UE) No 488/2014. (2014). *La Comisión UE de 12 de mayo de 2014 que modifica el Reglamento (CE) no 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de cadmio en los productos alimenticios*. Disponible en <https://www.boe.es/doue/2014/138/L00075-00079.pdf>
- Senior, W., Cornejo-Rodríguez, M., Tobar, J., Ramírez-Muñoz, M., & Márquez, A. (2016). Metales pesados (cadmio, plomo, mercurio) y arsénico en pescados congelados de elevado consumo en el Ecuador. *Zootecnia Tropical*, 34(2), 143-153.
- Storelli, M. M., Barone, G., Cuttone, G., Giungato, D., & Garofalo, R. (2010). Occurrence of toxic metals (Hg, Cd and Pb) in fresh and canned tuna: Public health implications. *Food and Chemical Toxicology*, 48(11), 3167-3170.
- Suhaimi, F., Wong, S. P., Lee, V. L. L., & Low, L. K. (2005). Heavy metals in fish and shellfish found in local wet markets. *Journal of Primary Industries*, 32, 1-18.
- Voegborlo, R., & El-Methnani, A. (1999). Mercury, cadmium and lead content of canned tuna fish. *Food Chemistry*, 67(4), 341-345.



A province with several climates: What knowledge of hydrology can be useful? A literature review



Andy M. Giler-Ormaza 

Department of Hydraulic Engineering, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 130103 Portoviejo, Ecuador.

Autor para correspondencia: andygiler90@hotmail.es

Fecha de recepción: 13 de agosto 2018 - Fecha de aceptación: 28 de agosto 2018

ABSTRACT

This article explores the hydrological state of the art that could be useful for a climate-diverse region, such as Manabí province in Ecuador. The province, with an area of 18,940 km², has a variety of tropical and dry climates. First, a review of the climatic conditions of the study area is carried out, since different sources disagree to some extent regarding climate types; then, a critical assessment of the relevant hydrologic literature is carried out. Here it is found that the literature best-suited for the conditions of Manabí includes literature for semi-arid, savannah and humid tropical hydrology. Several research gaps are found, but also a significant body of knowledge that could serve as a base for future studies. It should be noted that much of the available literature was obtained with vegetation and soil conditions that might differ from those of Manabí. Therefore, it is essential that findings from abroad are contrasted with results obtained in Manabí. Understanding of the hydrological functioning of the study area could contribute to the hydrologic literature for semi-arid, savannah and humid tropic climates.

Keywords: Hydrology, semi-arid, savannah, humid tropics, Köppen-Geiger climate classification, Ecuador coast, Manabí.

RESUMEN

El presente artículo explora el estado de la ciencia hidrológica que podría ser útil para una región con diversidad climática tal como lo es la provincia de Manabí en Ecuador. La provincia de Manabí, con un área de 18,940 km², tiene una variedad de climas tropicales y secos. Primero, se lleva a cabo una revisión de las condiciones climáticas del área de estudio, ya que diferentes fuentes discrepan, en cierta medida, con respecto a los tipos de clima; luego, se lleva a cabo una evaluación crítica de la literatura hidrológica relevante. Aquí se encuentra que la literatura más adecuada para las condiciones de Manabí incluye literatura para hidrología semiárida, sabana y tropical húmeda. Aun cuando se encontró vacíos de investigación, también existe una cantidad significativa de conocimiento, utilizable como base en futuros estudios. Cabe señalar que gran parte de la literatura disponible se obtuvo con condiciones de vegetación y suelo que podrían diferir de las de Manabí. Por lo tanto, es esencial que resultados de otros sitios de estudio se contrasten con aquellos obtenidos en Manabí. El entendimiento del funcionamiento hidrológico en el área de estudio podría contribuir a la literatura de hidrología para climas semiárido, de sabana y tropical húmedo.

Palabras clave: Hidrología, semiárida, sabana, trópicos húmedos, clasificación climática Köppen-Geiger, costa de Ecuador, Manabí.

1. INTRODUCTION

Manabí is a province of 18,940 km² located in Ecuador's coastal region. According to the recently updated Köppen-Geiger classifications has Manabí at least three climates: semi-arid (BSH), savannah (Aw and As) and tropical monsoon (Am) (Peel, Finlayson, & McMahon, 2007; Rubel & Kottek, 2010). This situation is somewhat like that of other regions in the world: many climates within a small region. On the other hand, the situation in the study area is contrasted with some countries in Europe, which fall entirely or mostly within a single Köppen-Geiger classification, e.g. the UK, Belgium, The Netherlands and Poland.

Since Petheram *et al.* (2012) claim that most of the world's population growth to 2050 is projected to occur in the tropics, there is a serious need for robust methods for water resource assessments to underpin the sustainable management of water in these regions. Authorities need

clear, visible and reliable information to be able to make well-informed decisions. In terms of water resources, having a variety of climates gives policy makers and practitioners more options, but at the same time, it can make management more challenging. Authorities ought more than ever before to make decisions based on scientific evidence. Unfortunately, at present, much of the evidence needed is not available, or has little visibility in Manabí and for regions with similar climates (Hughes, Heal, & Leduc, 2017).

In general, not a great deal of scientific literature has been generated in Manabí, nor in Ecuador as a whole (Feyen, Mila, Van Hoof, Quinde, Ochoa, & Bojorque, 2016; Sempertegui, Torres, Gallardo, & Hernández, 1990). This also applies to the fields of hydrology, meteorology and ecology. Often, methods and models from temperate regions are employed without considering that these models could have been developed under different climatic conditions. The findings thus may not be



applicable to Manabí and regions with similar climates. Furthermore, different sources of climatic information disagree to some extent with the climates in Manabí, making comparison with literature from other regions more challenging and less accurate. This creates confusion for researchers and practitioners.

The aim of this research is to review the hydrological state of the art that could be useful for a climate-diverse region like Manabí province in Ecuador. To achieve that, a review of the climatic conditions of the study area (Section 1) is first carried out; then, a critical assessment of the relevant hydrologic literature is conducted, highlighting gaps in research (Section 2).

2. METHODS

The literature review is based on local and international relevant scientific literature, government and Non-Governmental Organization (NGO) reports and press articles. Geographical Information Systems (GIS) were used to generate basic maps and figures, and when pictures were taken from other studies the source was acknowledged.

3. STUDY AREA

Manabí province is a province with an area of about 19,000 km², located in Ecuador's coastal region, is traversed by the equatorial line (0°0'0"), and the El Niño (ENSO) and Humboldt currents are usually present. The elevation ranges from sea level on the Pacific Ocean coast to about 500 meters above sea level (m.a.s.l) in the easternmost part. The province is often subject to droughts and flooding. In order to overcome these issues, structural measures including dams, irrigation systems, and major flood protection schemes were put in place, starting in 1971 with the Poza Honda dam (OAS, Republica del Ecuador, CRM, INERHI, & CONADE, 1991). Precipitation follows a roughly similar pattern to elevation, i.e. increasing from west to east. Nonetheless, strong rains can fall in most of the territory and flooding is an issue in many areas (Rossel, Goulven, Le, & Cadier, 1999; Rossel, Cadier, & Gomez, 1996). Regarding droughts, the plan has always been to convey water from the most humid areas in the east to the driest land in the west. While having a variety of climates on relatively such a small land area provides policy makers with more options; it also makes water resource management more challenging for them.

The largest urban areas are in the center and west of the province. Population is 1,369,780 and is currently growing at a rate of 1.6% (INEC, 2010). Much of the territory is mountainous, and there are not many wide valleys in which flat land is available for agriculture and urbanization. Nonetheless, agricultural and livestock activities have taken place in the hills for many years; mainly in the small hills but also in the lower parts of the larger mountains. Land use is continuously shifting between and towards economic land uses (Hernandez-Jimenez *et al.*, 2017; INEC *et al.*, 2012), what may place pressure on water resources management and natural disaster risk management.

4. SECTION 1: THE CLIMATIC CONDITIONS OF MANABÍ

What are the climates in Manabí?

To undertake an analysis of the province's hydrology, a review of its climates is first carried out. For this purpose, different sources of information are compared; among them: (i) a climate report prepared by Pourrut (1994) and the French institution of Development Research (IRD); (ii) the vegetation classification by Sierra (1999) (see Fig. 1); (iii) the updated Köppen-Geiger climate map by Peel *et al.* (2007) and Rubel & Kottek (2010) (see Fig. 2a and 2b); and (iv) the climate map provided by the Ecuadorian national meteorological and hydrological institution INAMHI (Moya, 2006) (see Fig. 2c). Note that INAMHI's map is based on Thornthwaite's worldwide classification (Moya, 2006).

In the updated Köppen-Geiger map by Peel *et al.* (2007), several climates appear in Manabí province - some of which would be expected in a tropical region: savannah (Aw), tropical monsoon (Am); some of which would be expected in a dry region: semi-arid hot (BSH) or arid hot desert (Bwh); as well as others that are not expected for Manabí, since they correspond to temperate climates: dry and warm summer (Csb), dry winter and warm summer (Cwb), and without dry season and warm summer (Cfb). With exception of the Cfb, Cwb, Csb and Bwh climates, the updated Köppen-Geiger information matches descriptions on the INAMHI's map and the information presented by Pourrut (1994). The Rubel & Kottek (2010) map is similar to the Peel *et al.* (2007) map. However, the former does not show any temperate climate for Manabí. That source will be further discussed in more detail.

According to the Köppen-Geiger map by Rubel & Kottek (2010), Manta is located in the **BSH** "arid steppe hot" (which might correspond to semi-arid), while Portoviejo is in the **As** "equatorial savannah with dry summer," Chone is in the **Aw** "equatorial savannah with dry winter," and the northeastern part of the province would correspond with the **Am** "equatorial monsoon." However, note that this map locates the main dam catchments within the savannah region. Errors of this type might be expected due to the map's global focus and the coarse size of the pixels. On the other hand, INAMHI's map has a better resolution and a more accurate representation of the climates in the province.

According to INAMHI, the easternmost Manabí area, in which part of the Daule Peripa dam basin is located, has a **B3 r A'** climate: "warm, humid, with no or small water excess." Moving westwards, in the areas of La Esperanza, Poza Honda, and the Río Grande catchment is the climate classified as **C2 s A'**: "warm, sub-humid, with moderate water deficit in dry season." Chone, Calceta and part of Portoviejo fall within the **C2 s2 A'** climate, meaning "warm, sub-humid with major water deficit in dry season." Most of Portoviejo falls within the **D d A'** climate, which is "warm, dry with no or small water excess." Finally, in the westernmost part of Manabí, in Manta, climate is **E d A'** which stands for "warm, arid with no or small water excess." Table 1 shows the meaning of each symbol on the INAMHI map. All figures were produced in Geographical Information Systems using data from the sources referred to above. Coordinates are projected local WGS84 17s format.

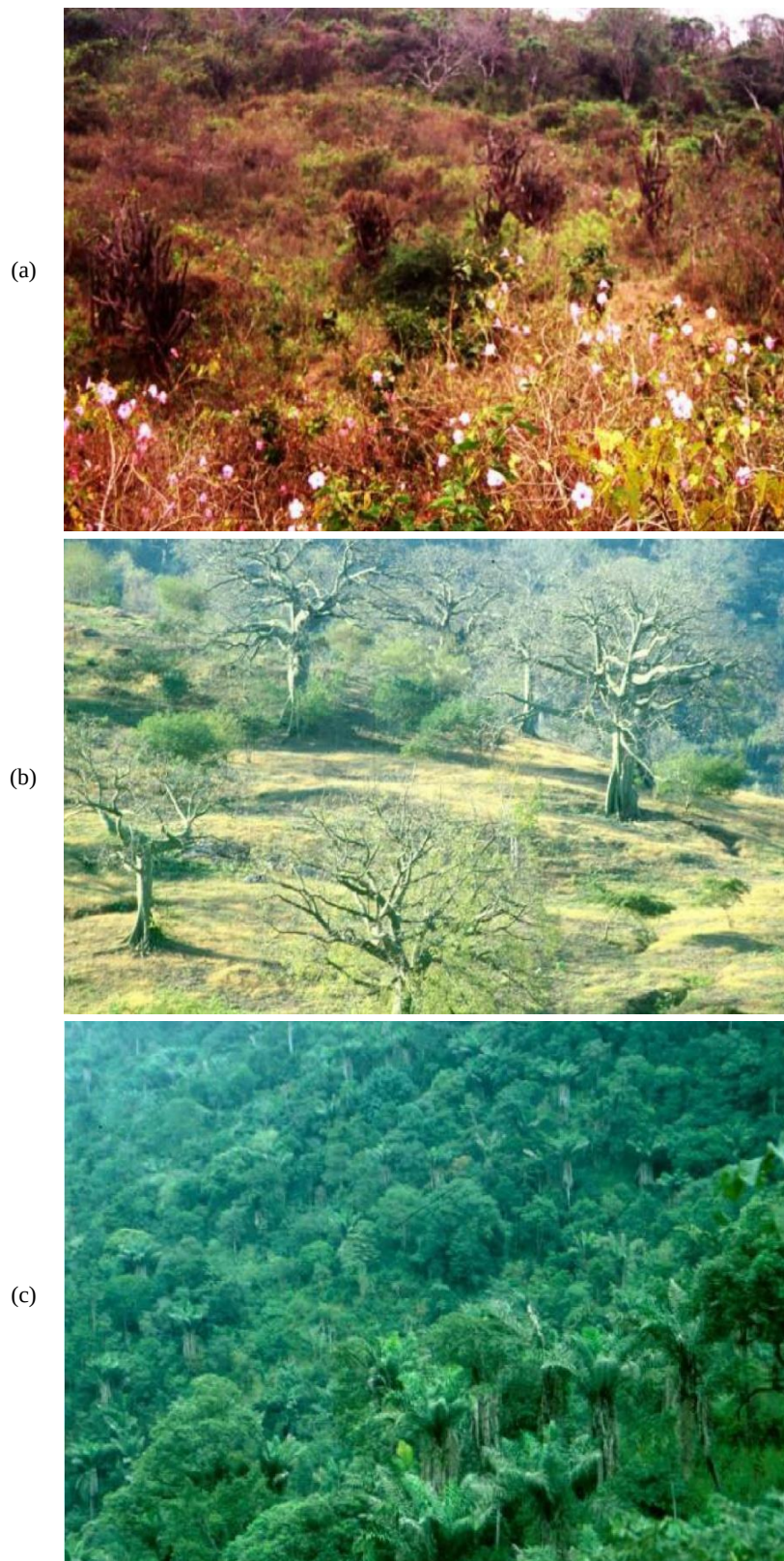


Figure 1. Three main classes of vegetation in Manabí (Source: Sierra, 1999): (a) Coastal dry shrubs in lowlands; (b) what is known as savannah; and (c) evergreen mountainous forest. These are considered to correspond with semi-arid, savannah and humid tropical climates, respectively.

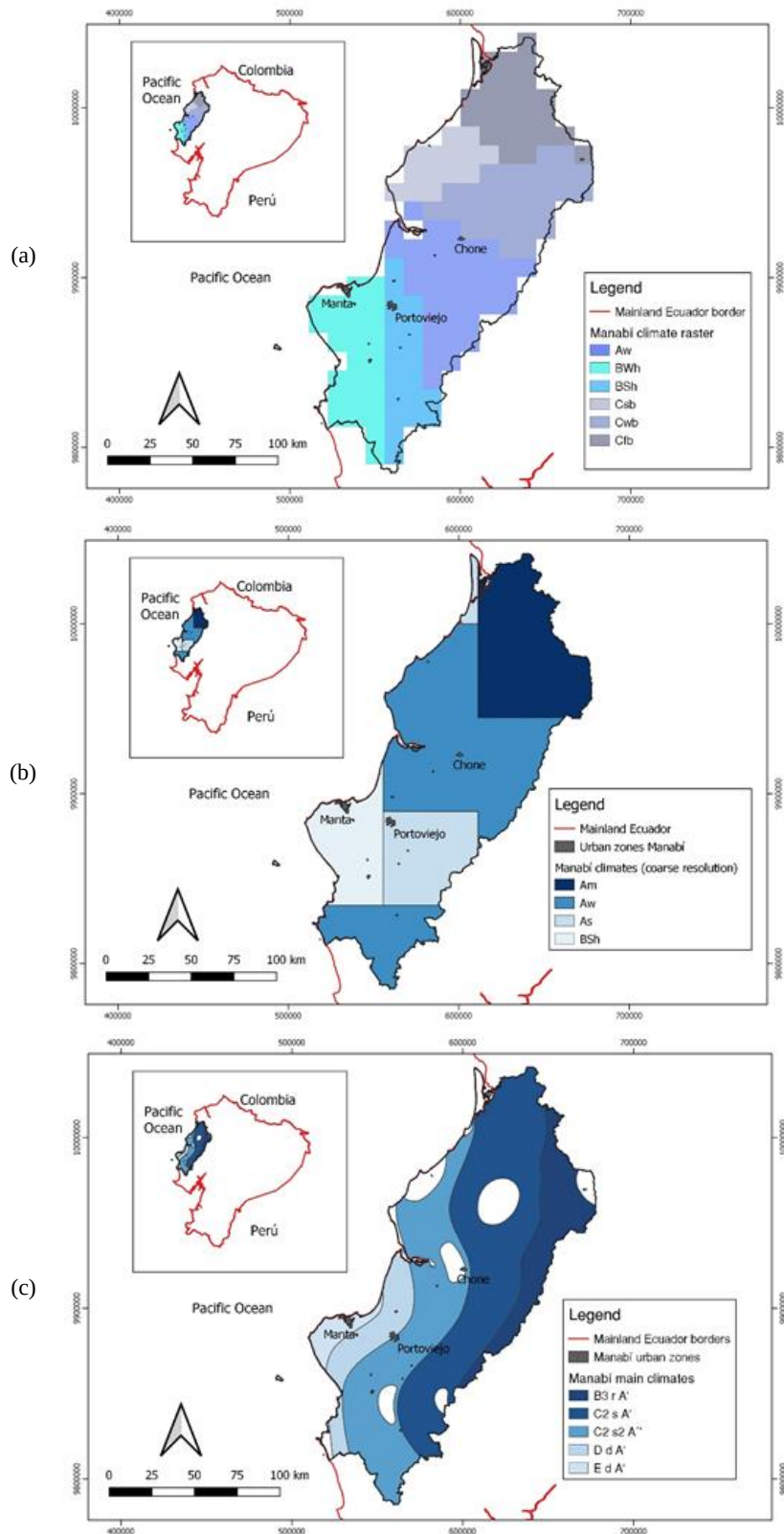


Figure 2. Main climates of Manabí province. (a) and (b) are the climates according to the updated Köppen-Geiger map by Peel *et al.* (2007) and Rubel & Kottek (2010), respectively; (c) is the map presented by INAMHI (Moya, 2006) following the Thornthwaite classification. Notice that microclimates are not represented (left in blank) although they appear in the original INAMHI map. All figures were produced in Geographical Information Systems using data from the sources referred to above. Coordinates are projected local WGS84 17s format.

While the Thornthwaite criteria are widely used and the INAMHI map is more accurate, Köppen is commonly applied primarily for educational purposes (Peel *et al.*, 2007) and it is, according to Kottek, Grieser, Beck, Rudolf, & Rubel (2006), the most frequently used source in climate classification. Perhaps this is because many of the names are straightforward to remember. Matching Köppen-Geiger descriptions to a good extent, Sierra (1999) presented a vegetation classification in which Manabí has areas with mountainous humid tropical forest called “Bosque siempreverde piemontano”. Here, it is considered that this could correspond with the Am climate class but also with a broader humid tropical forest classification (including Af). For this study, names similar to the Köppen-Geiger map are adopted, and Manabí is considered to have three main climates: Semi-Arid, corresponding with BSh; Savannah, including both Aw and As; and Humid tropical for Am. Selecting these three climates allows for a rapid comparison and review of the literature generated throughout the world in similar climatic areas.

According to Pourrut (1994) the region around Manta may have less than 200 mm of rainfall per year, most of it concentrated in the period December to April. According to Köppen-Geiger maps, this corresponds to the semi-arid and arid climate. Moving eastward from the Pacific Ocean, between 200 and 400 mm/year is the mean rainfall around Portoviejo, located on the border between the drier Manta climate and the relatively more humid climate of the savannah. From Portoviejo, there is a marked transition in rainfall within few kilometers. Two categories are found moving eastwards towards the Daule Peripa dam catchment. Rainfall changes to a range of 400 to 1,300 mm/year in a region that includes the surroundings of Chone, and then from 1,300 to 3,000 mm/year in the Daule Peripa catchment itself. This might correspond to a third category of climate (humid tropical) located further east, near to the boundaries with the Los Ríos, Santo Domingo and Guayas provinces.

Table 1. Definition of INAMHI climate map symbols (Source: Moya, 2006).

Water Regime Index	
Symbol	Definition
A	Super humid
B3	Humid
C2	Sub-humid
D	Dry
E	Arid
Seasonal Water Variation	
Symbol	Definition
r	No or small water deficit
s	Moderate water deficit in dry season
s2	Major water deficit in dry season
W	Moderated water excess in rainy season
d	No or small water excess
Temperature Regime	
Symbol	Definition
A'	Warm
B'4	Semi-warm or mild warm
B'3	Warm temperate
B'2	Cold temperate
B'1	Semi-cold or mild cold.

The mean annual temperature ranges from 18 to 24 degrees Celsius. There is not a marked transition in the temperature observed from east to west, but rather a difference between two categories: (1) the hottest area near the coast and in the valleys, where Manta, Portoviejo and Chone are located, at around 24 degrees Celsius; and (2) near 18 degrees Celsius in the mountainous areas where, for instance, Jipijapa is located.

5. SECTION 2: CRITICAL SURVEY OF RELEVANT LITERATURE

Semi-arid hydrology

The hydrology of semi-arid regions differs substantially from that of the more-studied temperate climates (Simmers, 2003). Rivers in those regions are ephemeral and many hydrological processes are not continuous or non-linear, whilst rivers in temperate regions tend to be perennial (García-Pintado, Barberá, Erena, & Castillo, 2009). Hortonian overland flow –also known as infiltration excess overland flow (IEOLF)– is believed to have the greatest contribution to the runoff in semi-arid regions, which is not the case in temperate regions (Bull, Kirby, Shannon, & Hooke, 2000). This implies that in semi-arid regions, hydrographs tend to be single-peaked and flashy, as IEOLF has been proven to be the type of runoff that reaches channels first (Camarasa-Belmonte, 2016). Because of IEOLF, erosion and sediment generation and transport processes are also accelerated in these regions. Sediment transport processes are especially relevant because they have an influence on flood risk and on the area's geomorphology (Bull & Kirkby, 2002). However, there are uncertainties in the knowledge of the semi-arid hydrological processes, and some physically-based models developed in temperate catchments have been reported to be unsuccessful in semi-arid catchments (García-Pintado *et al.*, 2009).

There are also other information gaps in terms of the hydrology and geomorphology of semi-arid areas. For instance, the extent to which IEOLF contributes to runoff in semi-arid regions has been challenged by recent studies, such as that conducted by van Schaik, Schnabel, & Jetten (2008) who found that subsurface “preferential flow” takes place in semi-arid regions under certain circumstances. Regarding the river geomorphology some authors found that every 10 years a cross-section-changing event occurs (Bull & Kirkby, 2002). However most of this research was conducted in a region not directly influenced by El Niño: i.e., Spain. Knowing the shape, a river will take is essential for populations living near rivers, in terms of their wellbeing and property insurance. Hydrology and geomorphology topics in semi-arid regions therefore need further research.

While in temperate regions hydrological modelling is used to analyze and understand hydrological processes, in semi-arid catchments modelling is seldom applied since there are issues that not yet have been solved or that have proved difficult to overcome. For instance, because many hydrological processes are not continuous, runoff is complicated to measure and study. In semi-arid catchments, the influence of “transmission losses” is related to these discontinuities (Dunkerley & Brown, 1999). Financial and logistics constraints may be two additional reasons why semi-arid hydrological processes

are less documented (Simmers, 2003). About logistics, research in semi-arid regions run into difficulties with establishing monitoring networks. This is partially because most significant rainfall events are very heterogeneous in space and time. In addition, problems such as personal safety and equipment robbery are common (Bull & Kirkby, 2002). Further, many measuring devices have been destroyed when flooding occurs (Maneta, Schnabel, & Jetten, 2008). In many cases, lack of knowledge in semi-arid regions does not allow to accurately mimic river discharges by hydrological models, thus placing constraints on the work of local practitioners.

There are several published studies that have demonstrated the lack of accuracy when attempting rainfall-runoff modelling in semi-arid and arid regions. Relevant model parameters are often not calibrated and high-quality data is generally not available. Neither is there any agreement in the literature as to which models give better results: empirical, semi-empirical or the more complex distributed models (McIntyre & Al-Qurashi, 2009). For instance, a study carried out in a catchment in Oman found poor prediction performance in most cases and higher-than-expected uncertainty (Al-Qurashi, McIntyre, Wheeler, & Unkrich, 2008). Based on the experience of these authors, the effort of using complex models is not justified for semi-arid and arid regions. A study using 10 rainfall-runoff models (McIntyre & Al-Qurashi, 2009) and a study in the US (Yatheendradas *et al.*, 2008) also found poor results and high uncertainties in rainfall-runoff modelling. Given that hydrological modelling may not be accurate enough, hydraulic modelling should be considered as an option that could provide a good solution, or a complementary one.

Savannah hydrology

Among all the literature on hydrology, the development of savannah climate hydrology is unique. Since it shows similarities with semi-arid climates –such as those found around the Mediterranean Sea– many authors have tried to extend the principles of the semi-arid hydrological processes to savannah catchments. In a similar practice, literature from more humid tropical river basin studies has been applied in savannah research because savannahs are, by definition, located in the tropics (Smith & Smith, 2007). Those attempts probably took place because of the lack of previous studies. Researchers tried to use existing or available literature to guide/refine their research questions, and/or to provide a framework for their research results.

Both semi-arid and savannah environments are characterized by water scarcity and ephemeral rivers. The precipitation is concentrated mostly or completely during a few months, while the rest of the year there is a lack of rainfall (Smith & Smith, 2007). Most savannah catchments are in developing countries, such as those of sub-Saharan Africa, and South America, except for Australia. These countries still lack extensive monitoring networks for hydrometeorological data collection (Petheram *et al.*, 2012). In general, a backlog of hydrological research exists in these regions. Nevertheless, few, yet important, efforts have been made by institutions such as ORSTROM (now IRD) and SCIRO. They have formed much of the basis for the existing knowledge and outlined certain research paths.

Despite the similarities between semi-arid and savannah, a few important differences exist that ultimately affect the

hydrological processes. Farrick & Branfireun (2014), found that semi-arid vegetation species have a type of waxy layer covering their leaves. This has not been found for savannah plants. Furthermore, the crusting patterns found on semi-arid soils are not reported on savannah soils. Both findings suggest an increase in the imperviousness of the surface layers with which rainfall interacts in the first place. This has been called “repellency”, and Farrick (2014) argues that frequent fires –which take place in semi-arid “Mediterranean” regions– increase this property. The low density of vegetation cover in semi-arid regions is also believed to be highly influential. Therefore, interactions of rainfall with canopy and soil surface could be expected to lead to different processes in terms of runoff production. Several studies have yet to confirm these findings and, as such, they should be taken with caution. Nevertheless, they raise awareness that differences between BSh and Aw-As can exist and could have an influence on the hydrological processes, and that more thorough research is needed. More attention from the scientific community could lead to stronger conclusions.

Despite the notable contribution to the body of knowledge by Australian authors, the applicability of their results could be inappropriate for Manabí. Although certain soil characteristics could be similar (Cook *et al.*, 1998), swelling clays can be found in both environments, there are also certain differences to consider. The slopes in the Australian wet-dry tropics are reported to be generally low. In Manabí’s Aw-As region, in contrast, the landscape is dominated by hills and valleys. Also, Australia’s dry evergreen environments differ significantly from its deciduous or semi-deciduous counterparts from the Americas –e.g., those in parts of Mexico and Manabí (see Fig. 3). In Australia, forests are evergreen because of soil infertility and the high cost of producing new leaves. Higher air temperatures are believed to favor the growth of evergreen trees. In addition, the soil composition (coarse) and the soil depth (shallow), together with the geological setting, cause water to be retained in an area above the impermeable layer, which can easily be reached by the evergreen tree roots (Bowman & Prior, 2005). In contrast, the soils in the Manabí savannah region are deeper and more fertile, which may explain the feasibility of yearly leaf production (Smith & Smith, 2007). For As-Aw areas, it has been shown that having vegetation cover, even if only in patches, can obstruct runoff reducing soil and water losses. Water infiltration in the soil is likely to increase (Bartley *et al.*, 2006). Because of these differences in land cover and canopy interactions with rainfall, runoff in Manabí and Australia can vary significantly.

Similar to the leaf and crusting uncertainty, there is no strong comparison between BSh and Aw-As in terms of connectivity and transmission losses. While there are some findings on transmission losses from the semi-arid counterpart, something similar could occur in savannah catchments. One study compelling a significant number of research concludes that, in some cases, “water losses are considerable” (Dubreuil, 1985). In addition, the characteristics of the storms bringing rainfall to savannah basins may be different from those of semi-arid basins. Surface runoff does not occur with much frequency in Aw-As environments. Some savannah catchments behave the same as temperate catchments in that specific thresholds of antecedent water storage and rainfall amounts are found prior to the start of runoff. Nonetheless, according to

Farrick & Branfireun (2013), “these remain completely undescribed, both empirically and conceptually, in tropical dry forest catchments”.



(a)



(b)

Figure 3. Comparisons of (a) Manabí savannah (Aw and As), and (b) Australia savannah (Sources: Sierra, 1999; Bartley *et al.*, 2006).

To further complicate research activities, savannah climates can have different names in different parts of the world, and local researchers write their reports using those names. For instance, in Brazil and in parts of South America they can be called Cerrado, Caatinga, Llanos or Dry Chaco; while in Australia, they are referred to as “wet/dry tropics,” or Dry Evergreen. It is curious that some Brazilian authors have referred to their study areas simply as “semi-arid” (Montenegro & Ragab, 2010; de Araújo & González, 2009). Perhaps this is done to place results in a wider context, although it fails to consider the differences that can exist. Studies in Mexico have referred to savannah catchment as “dry tropical” or “tropical deciduous” forests (Farrick & Branfireun, 2014; Vose & Maass, 1999). Furthermore, many studies have been written in French, Spanish or Portuguese, making them less visible for researchers from the primarily English-writing hydrological community.

Another environment in which to seek out Aw-As literature is in Sub-Saharan Africa. Findings there could provide interesting insights into the hydrology of savannah environments in general. For instance, in a study by Chevallier & Planchon (1993), it was found that all the primary known runoff generating processes take place in a savannah river basin. These include variable source area, Hortonian Overland Flow (HOLF), Saturation Excess

Overland Flow (SEOLF), soil pipes, preferential flow, throughflow, and return flow. Considering this, certain comparisons would be permissible.

Humid tropic hydrology

Compared with its counterparts in temperate regions, there is a sizable knowledge gap regarding the hydrology of humid tropics, including the hydrology of tropical rainforest (TRF). In particular, little is known about the potential changes in the evapotranspiration and runoff generation patterns which might result from human activities in these environments (Wohl *et al.*, 2012). There is also a need to determine the magnitudes of water fluxes and the residence times of water in the soil. Until today, it is known that a large part of the key event processes take place in the soil and in the forest canopy (Ward & Robinson, 2000).

With respect to the forest canopy, the layer can be regarded as a water reservoir. The canopy has a capacity for interception and storage of precipitation, either in the form of rain or mist (called horizontal precipitation) (Cavelier & Goldstein, 1989), and plays a particularly important role in TRF. The canopy also has an influence in/on the evapotranspiration processes (Wohl *et al.*, 2012). Individual canopy characteristics control the quantities and qualities of water temporarily stored in this layer (Fleischbein, Wilcke, Valarezo, Zech, & Knoblich, 2006), as well as the quantities and qualities of water that reach the soil through the branches, leaves and stems; also called “throughfall” (Bruijnzeel, 1990). Challenges to the measurement and quantification of water movements through these layers exist.

Before the water reaches the ground, it may interact with a layer of fallen leaves and branches accumulated on the ground’s surface, called the litter layer. This layer can be considered a small reservoir that gradually releases water during the dry season. However, there are uncertainties regarding litter hydrology of TRF with respect to the water holding capacity and the drainage rate. Most of the available literature is based on studies in regions with temperate climates. An interesting finding by Li, Niu, & Xie (2014) is that the litter layer reduces the runoff volume, produces a lag in the onset of runoff, and minimizes soil loss. In a tropical region, Park, Friesen, & Serrud (2010) carried out data collection and analysis in a setting with primarily commercial species that might not be found in Manabí. In many temperate and tropical regions, the accumulation of leaves might not occur in the same way as it does in Manabí’s humid forests, which probably is due to the differences in tree species.

While the forest canopy and the litter layer can have the function of protecting the soil from erosive processes, it can also hamper the generation of runoff as infiltration excess overland flow (Shaw, Beven, Chappel, & Lamb, 2010). Hortonian flow is often believed to have little relevance in forest environments, including humid tropical trees (Ward & Robinson, 2000), although its occurrence has been seen in association with steep slopes where natural vegetation has been cut, exposing the shallow soil (Campling, Gobin, Beven, & Feyen, 2002). However, there is still not enough literature or evidence to support the current state of knowledge. In fact, Bruijnzeel (2001) and Wohl *et al.* (2012) suggest that one of the most important knowledge gaps are the effects of the deforestation of tropical forests. All this invites us to carry

out research in fields where there are still processes to be understood.

The precipitation that has not been retained in the canopy layer, or in the litter layer, infiltrates. The interactions of water in the soil are diverse since, hydrologically speaking, there are many paths that the water can take (Ward & Robinson, 2000). Quantities of water can remain in the organic horizons (A, B and h) and return to the surface in short periods of time. Other quantities can penetrate towards the C horizon and return to the surface in longer periods of time and in geographic locations very distant from the initial location (Shaw *et al.*, 2010). These interactions are in turn related to other runoff generation mechanisms, including the saturation excess overland flow (SEOF) and flow through “natural pipes” or “pipes” (Chappell, 2010). With respect to natural pipelines in TRF soils, there are still gaps in knowledge, justifying more in-depth studies about the true influence of the flows by natural pipes. According to Chappell (2010) it is necessary to quantify the lengths and dimensions of “natural pipe” networks and the mechanisms recharging these pipe networks.

Compared to the number of publications from temperate regions, few studies have been conducted in tropical humid areas around the globe. However, the experiences of Kinner & Stallard (2004), Campling *et al.* (2002), and Mollicova, Grimaldi, Bonell, & Hubert (1997) are illustrative for good practice. In their studies, from different regions of the globe, they used hydrological modeling to determine the processes of runoff generation. Similarly, Chappell, Franks, & Larenus (1998) used hydrological modeling to determine soil properties that influence the runoff generation processes.

Regarding research on the hydrology of tropical humid forests in Ecuador, to the author’s knowledge, thus far studies have primarily been located in the eastern and western Andes mountain range (e.g. Fleischbein *et al.*, 2006; Boy, Valarezo, & Wilcke, 2008; Crespo *et al.*, 2012; Goller *et al.*, 2005). However, for Manabí, no studies have been found that attempt to describe or analyze the hydrological processes of tropical humid forests, let alone which attempt to specifically understand the processes of runoff generation. It is hereby recommended that studies on these topics be carried out.

6. CONCLUSIONS

For this study, names similar to the Köppen-Geiger map are adopted and Manabí is considered to have three climates: semi-arid, corresponding to BSh; savannah, including both Aw and As; and Am humid tropical climate. Selecting these three allows for a rapid comparison and review of the global literature in similar climate areas. Some areas in which focus might be prioritized are discussed below.

There is literature available for use in Manabí’s semi-arid region. Significant progress has been made elsewhere, mostly in Mediterranean areas. Since there might be differences between semi-arid Mediterranean catchments and Manabí BSh catchments –mostly in the soil and vegetation species– more research is needed to determine whether these findings could be applied in Manabí’s semi-arid region. Perhaps the main issue to be tackled are the difficulties faced in the establishment of monitoring

networks. Rainfall satellite data and remote sensing technologies should be employed where possible. Given that hydrological modelling may not be accurate enough, hydraulic modelling should be considered as an option that could provide a good solution, or a complementary solution, in obtaining flow rate data. Nonetheless, rainfall-runoff modelling is not discouraged. Some efforts could be made in Manabí before this option is discarded.

For the savannah region of Manabí, there are also many gaps to be filled. Here a call for caution is necessary, as many authors have tried to extend the principles of the semi-arid and humid tropical hydrological processes to savannah catchments. On the other hand, while some savannah literature from other regions –such as Africa and México– could be of use, given the differences outlined in the manuscript, findings in Australia might have their limitations. Perhaps the main point to investigate is whether Manabí semi-arid vegetation and soils have characteristics different than the Manabí savannah counterparts, which could lead to an increase in the imperviousness of the catchments. Here it is agreed with other authors that researchers should adopt one name for their findings regarding savannah climates, rather than reporting with different names such as “cerrado” or “caatinga.”

Regarding Manabí’s humid tropic hydrology, including tropical rainforest (TRF), there is a growing body of knowledge emerging from similar regions elsewhere around the globe which could be of use here. Nonetheless, given the potential differences between tree and shrub species found in Manabí and those found elsewhere, studies in Manabí must be carried out. Given the strong seasonality of rainfall in Manabí and the orographic effect, it is believed that many of Manabí’s TRF remain green because of the interception from clouds and mist in the mountainous areas. Attention should thus be given to the interception of water from mist and clouds together, especially in the quantification of this interception. Finally, given the land use change, another important area of focus is the effects on the dry season flow or on the total amount of water that may arise not only because of the deforestation of tropical forests, but also of their deciduous dry counterparts.

Thanks to having three climates in a relatively small region, Manabí could be regarded as a laboratory for hydrological research. It is evident that findings obtained in Manabí could also be applied to other regions with similar characteristics.

ACKNOWLEDGMENTS

Some ideas presented in this manuscript are also found in the author’s M.Sc. dissertation at the University of Leeds, UK. The author would like to thank M. Zamora and L. Reyna for their constructive comments on the late stages of the manuscript and to R. Cusme and M. Alcivar for providing support with the images.

REFERENCES

- Al-Qurashi, A., McIntyre, N., Wheeler, H., & Unkrich, C. (2008). Application of the Kinos2 rainfall-runoff model to an arid catchment in Oman. *Journal of Hydrology*, 355(1-4), 91-105. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.03.022>
- Bartley, R., Roth, C. H., Ludwig, J., McJannet, D., Liedloff, A., Corfield, J., ... Abbott, B. (2006). Runoff and erosion from Australia's tropical semi-arid rangelands: influence of ground cover for differing space and time scales. *Hydrological Processes*, 20(15), 3317-3333. <https://doi.org/10.1002/hyp.6334>
- Bowman, D. M. J. S., & Prior, L. D. (2005). Why do evergreen trees dominate the Australian seasonal tropics? *Australian Journal of Botany*, 53(5), 379-399. <https://doi.org/10.1071/BT05022>
- Boy, J., Valarezo, C., & Wilcke, W. (2008). Water flow paths in soil control element exports in an Andean tropical montane forest. *European Journal of Soil Science*, 59(6), 1209-1227. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01063.x>
- Bruijnzeel, L. (1990). Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion : A state of knowledge review. Paris, France: Unesco.
- Bruijnzeel, L. (2001). Hydrology of tropical montane cloud forest: A reassessment. *Land Use and Water Resources Research*, 1(1.1), 1-18.
- Bull, L., & Kirkby, M. (2002). Dryland rivers: Hydrology and geomorphology of semi-arid channels. England: Wiley.
- Bull, L., Kirkby, M., Shannon, J., & Hooke, J. (2000). The impact of rainstorms on floods in ephemeral channels in southeast Spain. *CATENA*, 38(3), 191-209. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00071-5](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00071-5)
- Camarasa-Belmonte, A. M. (2016). Flash floods in Mediterranean ephemeral streams in Valencia Region (Spain). *Journal of Hydrology*, 541, 99-115. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.019>
- Campling, P., Gobin, A., Beven, K., & Feyen, J. (2002). Rainfall-runoff modelling of a humid tropical catchment: The TOPMODEL approach. *Hydrological Processes*, 16(2), 231-253. <https://doi.org/10.1002/hyp.341>
- Cavelier, J., & Goldstein, G. (1989). Mist and fog interception in elfin cloud forests in Colombia and Venezuela. *Journal of Tropical Ecology*, 5(3), 309-322. <https://doi.org/10.1017/S0266467400003709>
- Chappell, N. A. (2010). Soil pipe distribution and hydrological functioning within the humid tropics: A synthesis. *Hydrological Processes*, 24(12), 1567-1581. <https://doi.org/10.1002/hyp.7579>
- Chappell, N. A., Franks, S. W., & Larenus, J. (1998). Multi-scale permeability estimation for a tropical catchment. *Hydrological Processes*, 12(9), 1507-1523. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199807\)12:9<1507::AID-HYP653>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199807)12:9<1507::AID-HYP653>3.0.CO;2-J)
- Chevallier, P., & Planchon, O. (1993). Hydrological processes in a small humid savanna basin (Ivory Coast). *Journal of Hydrology*, 151(2-4), 173-191. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(93\)90235-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90235-2)
- Cook, P. G., Hatton, T. J., Pidsley, D., Herczeg, A. L., Held, A., O'Grady, A., & Eamus, D. (1998). Water balance of a tropical woodland ecosystem, Northern Australia: A combination of micro-meteorological, soil physical and groundwater chemical approaches. *Journal of Hydrology*, 210(1-4), 161-177. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00181-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00181-4)
- Crespo, P., Bucker, A., Feyen, J., Vaché, K. B., Frede, H. G., & Breuer, L. (2012). Preliminary evaluation of the runoff processes in a remote montane cloud forest basin using Mixing Model Analysis and Mean Transit Time. *Hydrological Processes*, 26(25), 3896-3910. <https://doi.org/10.1002/hyp.8382>
- de Araújo, J., & González, J. (2009). Comparative hydrology: analysis of a semiarid and a humid tropical watershed. *Hydrological Processes*, 23(1), 1169-1178. <https://doi.org/10.1002/hyp.7232>
- Dubreuil, P. (1985). Rreview of field observation of runoff generation., 80.
- Dunkerley, D., & Brown, K. (1999). Flow behaviour, suspended sediment transport and transmission losses in a small (sub-bank-full) flow event in an Australian desert stream. *Hydrological Processes*, 13(11), 1577-1588. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19990815\)13:11<1577::AID-HYP827>3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19990815)13:11<1577::AID-HYP827>3.0.CO;2-L)
- Farrick, K. K. (2014). Runoff generation in a tropical dry forest watershed: Processes, patterns and connectivity. Doctoral thesis, The University of Western Ontario, Canada. Retrieved from <http://ir.lib.uwo.ca/etd/2523%5Cnhttp://ir.lib.uwo.ca/cg/viewcontent.cgi?article=4003&context=etd%5Cnhttp://ir.lib.uwo.ca/etd/2523/>
- Farrick, K. K., & Branfireun, B. A. (2013). Left high and dry: A call to action for increased hydrological research in tropical dry forests. *Hydrological Processes*, 27(22), 3254-3262. <https://doi.org/10.1002/hyp.9935>
- Farrick, K. K., & Branfireun, B. A. (2014). Infiltration and soil water dynamics in a tropical dry forest: It may be dry but definitely not arid. *Hydrological Processes*, 28(14), 4377-4387. <https://doi.org/10.1002/hyp.10177>
- Feyen, J., Milia, M., Van-Hoof, H., Quinde, K., Ochoa, V., & Bojorque, J. (2016). Improving the publication visibility of Ecuador ' s higher education system, Maskana, 7(2), 113-125.
- Fleischbein, K., Wilcke, W., Valarezo, C., Zech, C., & Knoblich, K. (2006). Water budgets of three small catchments under montane forest in Ecuador: experimental and modelling approach. *Hydrological Processes*, 20(1), 2491-2507. <https://doi.org/10.1002/hyp.6212> Water
- García-Pintado, J., Barberá, G. G., Erena, M., & Castillo, V. M. (2009). Calibration of structure in a distributed forecasting model for a semiarid flash flood: Dynamic surface storage and channel roughness. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 165-184. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.024>
- Goller, R., Wilcke, W., Leng, M. J., Tobschall, H. J., Wagner, K., Valarezo, C., & Zech, W. (2005). Tracing water paths through small catchments under a tropical montane rain forest in south Ecuador by an oxygen isotope approach. *Journal of Hydrology*, 308(1-4), 67-80. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.022>
- Hernandez-Jimenez, A., Vera-Macias, L., Naveda-Basurto, C., Guzman-Cedeno, A., Vivar-Arrieta, M., Zambrano, T., ... Lopez-Alava, G. (2017). Variaciones

- en algunas propiedades del suelo por el cambio de uso de la tierra, en las partes media y baja de la microcuenca Membrillo, Manabí, Ecuador. *Cultivos Tropicales*, 38(1), 50-56. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362017000100006&lng=en&nrm=iso.com&tlng=es
- Hughes, D., Heal, K., & Leduc. (2017). Improving the visibility of hydrological sciences from developing countries. *Hydrological Sciences Journal - Journal Des Sciences Hydrologiques*, 59(9), 1627-1635. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.938653>
- INEC. (2010). *Resultados del de población y vivienda Censo 2010 en el Ecuador*. Retrieved from <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Manu-lateral/Resultados-provinciales/manabi.pdf>
- INEC, Naranjo, L., Chaves, R., Salazar, D., Orejuela, D., Cuichán, M., ... Villafuerte. (2012). *Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua 2012. Inec*. Retrieved from http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac_2012/InformEjecutivo.pdf
- Kinner, D. A., & Stallard, R. F. (2004). Identifying storm flow pathways in a rainforest catchment using hydrological and geochemical modelling. *Hydrological Processes*, 18(15), 2851-2875. <https://doi.org/10.1002/hyp.1498>
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259-263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Li, X., Niu, J., & Xie, B. (2014). The effect of leaf litter cover on surface runoff and soil erosion in Northern China. *PLoS ONE*, 9(9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107789>
- Vose, J. M., & Maass, J. M. (1999). Comparative nalysis of hydrologic responses of tropical deciduous and temperate deciduous watershed to climatic change. In: C. Aguirre-Bravo, F. C. Rodriguez (Eds.). North American science Symposium: toward a unified framework for inventorying and monitoring forest ecosystem resources; 1998 November 2-6; Guadalajara, Mexico. Proceedings RMRS-P-12. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station: 292-298
- Maneta, M., Schnabel, S., & Jetten, V. (2008). Continuous spatially distributed simulation of surface and subsurface hydrological processes in a small semiarid catchment. *Hydrological Processes*, 22(13), 2196-2214. <https://doi.org/10.1002/hyp.6817>
- McIntyre, N., & Al-Qurashi, A. (2009). Performance of ten rainfall-runoff models applied to an arid catchment in Oman. *Environmental Modelling and Software*, 24(6), 726-738. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.11.001>
- Molicova, H., Grimaldi, M., Bonell, M., & Hubert, P. (1997). Using Topmodel towards identifying and modeling thehydrological patterns within a headwater, humid, tropical catchment. *Hydrological Processes*, 11(April 1996), 1169-1196.
- Montenegro, A., & Ragab, R. (2010). Hydrological response of a Brazilian semi-arid catchment to different land use and climate change scenarios: A modelling study. *Hydrological Processes*, 24(19), 2705-2723. <https://doi.org/10.1002/hyp.7825>
- Moya, R. (2006). *Climas del Ecuador*. Quito, Ecuador: INAMHI. Retrieved from <http://186.42.174.231/gisweb/METEOROLOGIA/CLIMATOLOGIA/Climas del Ecuador 2006.pdf>
- OAS, Republica del Ecuador, CRM, INERHI, & CONADE. (1991). *Plan integral de desarrollo de los recursos hídricos de la Provincia de Manabí*. Washington, D.C. Retrieved from <https://www.oas.org/DSD/publications/Unit/oea40s/begin.htm#Contents>
- Park, A., Friesen, P., & Serrud, A. A. S. (2010). Comparative water fluxes through leaf litter of tropical plantation trees and the invasive grass *Saccharum spontaneum* in the Republic of Panama. *Journal of Hydrology*, 383(3-4), 167-178. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.12.033>
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633-1644. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Petheram, C., Rustomji, P., McVicar, T. R., Cai, W., Chiew, F. H. S., Vleeshouwer, J., ... Perraud, J.-M. (2012). Estimating the impact of projected climate change on runoff across the tropical savannas and semiarid rangelands of Northern Australia. *Journal of Hydrometeorology*, 13(2), 483-503. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-062.1>
- Pourrut, P. (1994). *L'eau en Equateur: principaux acquis en hydroclimatologie*. Paris, France: ORSTOM. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/39856198.pdf>
- Rossel, F., Cadier, E., & Gomez, G. (1996). Las inundaciones en la zona costera ecuatoriana: causas; obras de proteccion existentes y previstas. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, XXV, 3, (January 1996), 339-420.
- Rossel, F., Goulven, P. Le, & Cadier, E. (1999). Répartition spatiale de l'influence de l' ENSO sur les précipitations annuelles en Equateur. *Revue des Sciences de l'Eau*, 12(1), 183-200. <https://doi.org/10.7202/705348ar>
- Rubel, F., & Kottek, M. (2010). Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorologische Zeitschrift*, 19(2), 135-141. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2010/0430>
- Sempertegui, J., Torres, G., Gallardo, G., & Hernández, A. (1990). *Estado actual del desarrollo de la Ciencia y Tecnología en el Ecuador*. Retrieved from <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/993/1/T-SENESCYT-0199.pdf>
- Shaw, E., Beven, K., Chappel, N., & Lamb, R. (2010). *Hydrology in practice* (4th ed.). CRC Press.
- Sierra, R. (1999). *Propuesta preliminar de un sistema de clasificación de vegetación para el Ecuador Continental*. Retrieved from http://www.academia.edu/2081344/Propuesta_preliminar_de_un_sistema_de_clasificación_de_vegetación_

- para_el_Ecuador_Continental_proyecto_INEFAN_GE
F-BIRF_y_EcoCiencia_Preliminary_
<https://doi.org/10.13140/2.1.4520.9287>
- Simmers, I. (2003). *Understanding water in a dry environment: Hydrological processes in arid and semi-arid zones*. IAH International Contributions to Hydrogeology 23. Publisher: A. A. Balkema. Retrieved from http://web.sahra.arizona.edu/swhydro/archive/V3_N2/dept-inprint.pdf
- Smith, T. M., & Smith, R. L. (2007). *Ecología* (6th ed.). Madrid, España: Pearson Addison Wesley.
- van Schaik, N. L. M. B., Schnabel, S., & Jetten, V. G. (2008). The influence of preferential flow on hillslope hydrology in a semi-arid watershed (in the Spanish Dehesas). *Hydrological Processes*, 22(18), 3844-3855. <https://doi.org/10.1002/hyp>
- Ward, R. C., & Robinson, M. (2000). *Principles of hydrology* (4th ed.). London, UK: McGraw-Hill Publishing Co.
- Wohl, E., Barros, A., Brunsell, N., Chappell, N. A., Coe, M., Giambelluca, T., ..., Ogden, F. (2012). The hydrology of the humid tropics. *Nature Climate Change*, 2(9), 655-662. <https://doi.org/10.1038/nclimate1556>
- Yatheendradas, S., Wagener, T., Gupta, H., Unkrich, C., Goodrich, D., Schaffner, M., & Stewart, A. (2008). Understanding uncertainty in distributed flash flood forecasting for semiarid regions. *Water Resources Research*, 44(5), 1-17. <https://doi.org/10.1029/2007WR005940>



Umbrales en la respuesta de humedad del suelo a condiciones meteorológicas en una ladera Altoandina



Daniel Tenelanda Patiño¹, **Patricio Crespo Sánchez^{1,2,3}**, **Giovanny Mosquera Rojas^{1,3}**

¹ Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales, Universidad de Cuenca, Ecuador

² Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador

³ Carrera de Ingeniería Agronómica, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador

⁴ Institute for Landscape Ecology and Resources Management, Justus-Liebig-Universität Gießen, Germany

Autor para correspondencia: dtenelanda@gmail.com

Fecha de recepción: 2 de agosto 2018 - Fecha de aceptación: 5 de noviembre 2018

RESUMEN

El suelo y su cobertura vegetal desempeñan un papel crítico en la hidrología del Páramo Andino, proporcionando escorrentía, principalmente por flujo subsuperficial poco profundo. Comprender la dinámica de la humedad del suelo bajo cobertura vegetal prístina, durante eventos de lluvia, es esencial para la planificación futura de los recursos hídricos, considerando la creciente influencia antrópica. Por lo tanto, este estudio se centra en la evaluación de los controladores y umbrales en el cambio máximo de la humedad del suelo ($\Delta\theta_{\max}$) durante eventos de lluvia y su dinámica durante diferentes condiciones de humedad. Los factores que controlan $\Delta\theta_{\max}$, determinados mediante el coeficiente de correlación de Spearman, fueron el volumen precipitado, la intensidad del evento, la humedad antecedente y las condiciones climáticas previas de 5 y 15 días. El análisis de umbrales reveló una respuesta de aumento o disminución en función del estado de humedad, la posición topográfica y la profundidad del estrato de suelo. Este estudio demuestra que, bajo vegetación prístina del Páramo, la precipitación, la humedad antecedente y las condiciones climáticas, determinan, en gran medida, el estado de humedad del suelo que afecta posteriormente la conectividad de las laderas y su funcionamiento hidrológico.

Palabras clave: Humedad del suelo, eventos de lluvia, factores que controlan la humedad del suelo, umbrales de lluvia, ladera de Páramo Andino.

ABSTRACT

Soil and vegetation cover play a critical role in the hydrology of the Andean Páramo generating runoff primarily by shallow subsurface flow. Understanding the dynamics of soil moisture response under pristine vegetation cover during rainfall events is essential for water resource planning considering the increasing anthropogenic pressure. Hence, this study focuses on the evaluation of the factors and thresholds controlling maximum changes in soil moisture ($\Delta\theta_{\max}$) during rainfall events and their dynamics during different wetness conditions (from dry to wet). To determine the factors controlling $\Delta\theta_{\max}$, a nonparametric Spearman correlation coefficient test was applied. We found that the factors controlling $\Delta\theta_{\max}$ were the precipitated volume, intensity, moisture conditions just before the event and the 5- and 15-days antecedent weather conditions. The threshold analysis shows a response of increase or decrease as function of moisture state, topographic position and soil layer depth. This study demonstrates that under pristine Andean Páramo vegetation precipitation, antecedent moisture and weather conditions determine to a significant degree the soil moisture status affecting subsequently hillslope connectivity and hydrologic functioning.

Keywords: Soil moisture response, rainfall event scale, factors controlling soil moisture response, rainfall thresholds, Andean Páramo hillslope.

1. INTRODUCCIÓN

La humedad del suelo (θ) es bien conocida como el factor clave que vincula las fluctuaciones climáticas y la dinámica de la vegetación en el espacio y el tiempo (Rodríguez-Iturbe, 2000). Como tal, ejerce un fuerte efecto sobre los flujos hidrológicos en el continuo suelo-planta-atmósfera. Por lo tanto, aumentar la comprensión de la respuesta de θ , frente a eventos de lluvia, es esencial para mejorar la conservación y mitigación de los impactos del uso del suelo y cambio climático, y, de esta manera, generando una comprensión profunda de los procesos y controles involucrados en la respuesta hidrológica de las

regiones montañosas, en donde θ influye de manera trascendental en los procesos hidrológicos (Dusek & Vogel, 2016; He, Zhao, Liu, & Chang, 2012; Tetzlaff *et al.*, 2007). Aunque esta comprensión es importante a nivel mundial, los ecosistemas húmedos de pradera de las regiones montañosas de los Andes (conocidos como el Páramo) son de particular interés dada la escasez y calidad de datos (Buytaert & Beven, 2010; Celleri, Willems, Buytaert, & Feyen, 2007), las presiones antropogénicas que afectan los recursos hídricos (Buytaert, Iñiguez, & De Bièvre, 2007; Crespo *et al.*, 2010; Ochoa-Tocachi *et al.*, 2016) y las incertidumbres relacionadas con el cambio futuro del clima (Buytaert & De Bièvre, 2012). En este



sentido, el monitoreo de θ y los estudios eco-hidrológicos son escasos debido a dificultades económicas y logísticas (Crespo *et al.*, 2011; Mosquera *et al.*, 2016) a pesar del importante papel de los ecosistemas de Páramo como principal proveedor de servicios económicos y ambientales en la región (Buytaert *et al.*, 2006; Célleri & Feyen, 2009).

Los estudios hidrológicos del Páramo sugieren que los principales factores a los cuales se puede atribuir la regulación hídrica incluyen la precipitación, la cual es sostenida a lo largo del año (Muñoz, Célleri, & Feyen, 2016; Padrón, Wilcox, Crespo, & Celleri, 2015) y a la alta capacidad de infiltración y almacenamiento de agua de sus suelos (Buytaert, Wyseure, De Bievre, & Deckers, 2005). Por otro lado, estudios relacionados a la identificación de fuentes de generación de escorrentía han demostrado la importancia de los suelos (altamente correlacionados con la cobertura vegetal y la posición topográfica) en la respuesta hidrológica del Páramo (Mosquera, Lazo, Célleri, Wilcox, & Crespo, 2015). De esta manera, el movimiento de agua a través de las laderas se vuelve trascendental, considerando la topografía empinada de las cuencas de Páramo y al hecho de que la escorrentía generada está compuesta principalmente por flujo subsuperficial derivado de los suelos (Correa *et al.*, 2017; Mosquera *et al.*, 2016). Sin embargo, bajo cobertura vegetal prístina del Páramo, estudios sobre la vinculación de la respuesta de θ con la precipitación aún no se han llevado a cabo. Inclusive, aún se desconoce en su totalidad acerca de los controladores y umbrales que regulan la dinámica de θ dentro de los diferentes estratos de suelo y las posiciones topográficas de la ladera durante eventos de lluvia.

Estudios en una gran variedad de ecosistemas a escala de parcela y ladera han revelado que los principales factores que controlan la dinámica de θ son: el volumen precipitado e intensidad del evento (Albertson & Kiely, 2001; He *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2015); las propiedades del suelo (Gwak & Kim, 2017; Weiler & Naef, 2003); la topografía (Famiglietti, Rudnicki, & Rodell, 1998; Grayson, Western, & Chiew, 1997); el clima (Lawrence & Hornberger, 2007); y las condiciones antecedentes de humedad del suelo (Ivanov *et al.*, 2010; Jost, Schume, & Hager, 2004). Por otra parte, la respuesta umbral, observada entre el volumen de un evento de lluvia y el flujo subsuperficial generado, se ha aceptado como una propiedad emergente de estudios a escala de ladera (Buttle, Dillon, & Eerkes, 2004; Graham, Woods, & McDonnell, 2010). Las relaciones de umbral entre la lluvia y la escorrentía subsuperficial a esta escala se han demostrado en varios ecosistemas, basándose en la medición directa de flujo en zanjias excavadas al pie de las laderas (Buttle & McDonald, 2002; Tromp-van Meerveld & McDonnell, 2006). Según Tromp-van Meerveld & McDonnell (2006), el umbral de precipitación necesario para generar flujo subsuperficial es una propiedad de la ladera que depende en gran medida de la permeabilidad y topografía del lecho rocoso, los flujos preferenciales y las propiedades de los suelos del sitio específico de estudio. No obstante, la variación de estos umbrales ha sido difícil de generalizar, dado el desafío de realizar mediciones en las laderas y debido a que pueden presentarse variaciones en función de los volúmenes precipitados durante el evento, así como variaciones debidas a las diferentes condiciones antecedentes de humedad que, según Graham *et al.* (2010), deben ser analizados para un mejor entendimiento de los procesos hidrológicos de subsuperficie.

Por tanto, este estudio busca mejorar la comprensión del funcionamiento hidrológico a nivel de subsuperficie de los ecosistemas de Páramo, mediante la evaluación de $\Delta\theta_{\max}$ durante eventos de lluvia en diferentes posiciones topográficas y estratos de suelo de una ladera cubierta con vegetación prístina del Páramo. Para este fin, registros de θ y de las condiciones meteorológicas serán usados para dar respuesta a las siguientes preguntas de investigación: i) ¿Cuáles son los controladores de $\Delta\theta_{\max}$ durante eventos de lluvia bajo diferentes estados de humedad? y ii) ¿Cuál es la variación de la respuesta umbral de los controladores identificados durante cada estado de humedad?

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Ladera experimental de estudio

La ladera experimental se encuentra ubicada en el Observatorio Ecohidrológico del río Quinuas (94.1 km²) al sur del Ecuador (2°47'31.3" S, 79°12'15.0" W), dentro de la Reserva de Biósfera del Macizo del Cajas. La cuenca tiene una variación altitudinal entre 3,100 a 4,250 ms.n.m., caracterizada por una geomorfología empinada, con una pendiente promedio del 42%. En la cabecera de la cuenca, donde se encuentra ubicada la estación meteorológica y la ladera de estudio (P1 y T1 en la Fig. 1a), la precipitación anual promedio es de 1,080 mm, la temperatura y humedad relativa del aire son, en promedio, de 8.7°C y 93.5%, respectivamente (Muñoz *et al.*, 2016). La ladera está cubierta por la vegetación prístina más común de un ecosistema de Páramo, conocida como pajonal (*Calamagrostis sp.*), la cual representa más del 70% del área total de la cuenca (Fig. 1b). Esta ladera fue monitoreada en tres posiciones topográficas, denominadas la parte alta (A), media (M) y baja (B) (Fig. 1c), ubicadas a 4,006, 3,958 y 3,913 m s.n.m., respectivamente. La distancia entre las posiciones A y B es de 200 m, con una pendiente del 42%. Las características topográficas, edáficas, y de cobertura vegetal, son representativas de las laderas de la cuenca. En la ladera experimental se encontró únicamente suelos Andosoles, caracterizados por un horizonte Ah con una profundidad media de 0.61 m, seguido de un horizonte mineral C con una profundidad media de 0.50 m (Blanco, Gomez, Crespo, & Ließ, 2018).

2.2. Propiedades hidrofísicas del suelo

Las propiedades hidrofísicas del suelo se determinaron en cada posición topográfica (A, M y B) y a cuatro profundidades de monitoreo (5, 20, 45 y 75 cm; Fig. 1d) dentro de la ladera (Tabla 1). Estas profundidades incluyeron la caracterización de los horizontes de suelo orgánico (Ah) y mineral (C), específicamente: (i) la zona con predominancia de raíces del horizonte Ah a 5 cm; (ii) la capa de horizonte Ah a 20 cm; (iii) la capa de transición entre los horizontes Ah y C a 45 cm, y (iv) el horizonte C a 75 cm (Fig. 1d). En cada posición topográfica y profundidad se realizaron tres repeticiones para capturar la variabilidad espacial. Los datos reportados corresponden a una media de las tres mediciones.

La conductividad hidráulica saturada (Ks) de los suelos se determinó mediante pruebas de campo, utilizando el método de pozo invertido (Oosterbaan & Nijland, 1994). La densidad aparente (BD) y los contenidos de humedad en pF 0 (punto de saturación) y pF 2.52 (capacidad de

campo) se determinaron utilizando muestras de suelo inalterado, recolectadas en anillos de acero de 100 cm³. El contenido de humedad en pF 4.2 (punto de marchitez) se determinó usando 1,000 gr de muestras alteradas de suelo.

Los contenidos de humedad en pF 0 se determinaron mediante gravimetría, usando las muestras saturadas. Los contenidos de humedad en pF 2.52 y pF 4.2 se determinaron mediante ollas de presión con membranas (van Reeuwijk, 1993). Los contenidos de humedad gravimétrica se transformaron en contenidos volumétricos de agua (cm³ cm⁻³).

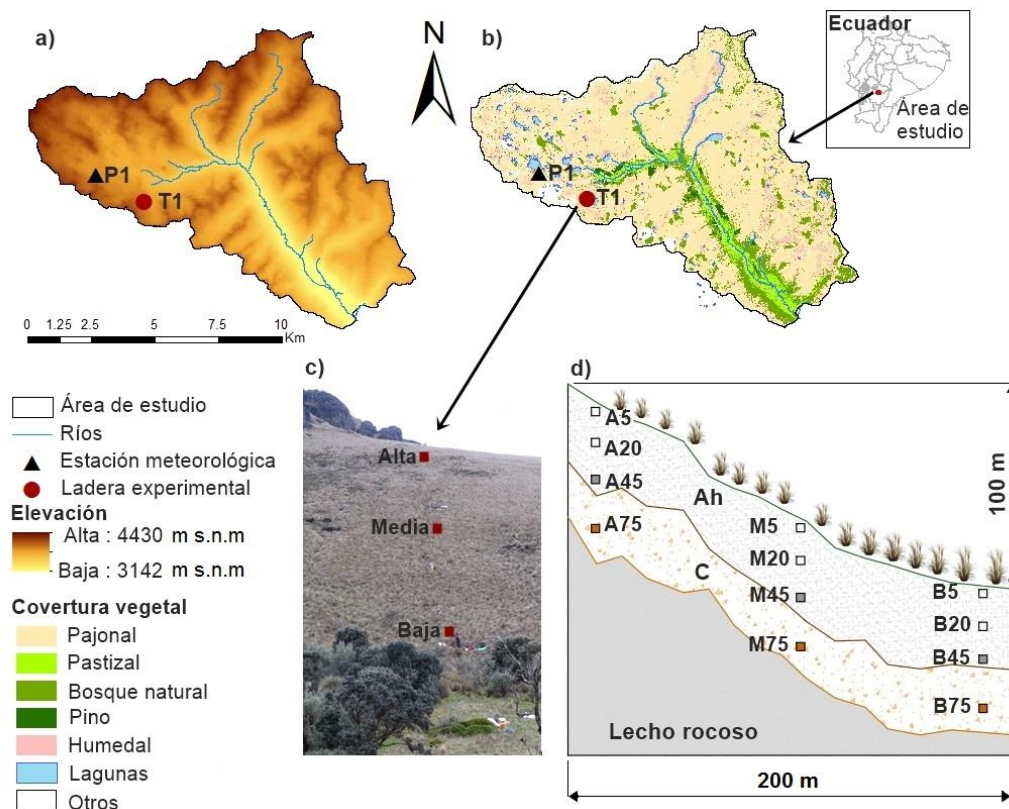


Figura 1. Ladera experimental de estudio, localizada dentro del Observatorio Ecohidrológico del río Quinuas, al sur del Ecuador, ubicación de la ladera (T1), estación meteorológica (P1): a) mapa de elevación; b) mapa de cobertura vegetal; c) fotografía de T1 con las respectivas posiciones topográficas monitoreadas (cuadrados rojos); y d) profundidades y posiciones de monitoreo de la humedad del suelo en T1. En la Figura 1d Ah denota el horizonte orgánico y C el horizonte mineral, las abreviaciones A5, M5, B5 etc., denotan la posición alta, media y baja, respectivamente, a una profundidad de 5 cm.

Tabla 1. Propiedades hidrofísicas del suelo en diferentes posiciones topográficas, horizontes y profundidades de la ladera experimental. Ksat = conductividad hidráulica saturada; BD = densidad aparente y pF = potencial matricial del suelo expresado como log₁₀ (cm columna de agua) en saturación (pF 0), capacidad de campo (pF 2.52) y punto de marchitez (4.2).

Posición	Prof. (cm)	Horizonte	Ksat (cm hr ⁻¹)	BD (g cm ⁻³)	pF 0 (cm ³ cm ⁻³)	pF 2.52 (cm ³ cm ⁻³)	pF 4.2 (cm ³ cm ⁻³)
A	5	Ah	1.69	0.33	0.84	0.69	0.47
A	20	Ah	0.46	0.39	0.80	0.67	0.53
A	45	Ah	0.24	0.30	0.85	0.68	0.37
A	75	C	0.55	1.07	0.59	0.52	0.28
M	5	Ah	0.93	0.37	0.82	0.68	0.42
M	20	Ah	0.67	0.46	0.78	0.65	0.50
M	45	Ah	0.32	0.51	0.78	0.63	0.50
M	75	C	1.55	1.37	0.48	0.42	0.34
B	5	Ah	1.34	0.29	0.84	0.65	0.37
B	20	Ah	0.45	0.29	0.84	0.67	0.37
B	45	Ah	0.29	0.35	0.84	0.70	0.34
B	75	C	2.59	0.91	0.65	0.55	0.12

2.3. Mediciones del contenido de humedad del suelo y recopilación de datos meteorológicos

La ladera experimental fue instrumentada para monitorear θ en las posiciones A, M y B y a profundidades de 5, 20, 45 y 75 cm usando sensores de capacitancia 5TE y 10HS (Decagon Devices, Inc., Pullman, EE. UU.), en intervalos de 5 minutos durante el período de abril de 2015 a enero de 2017. Diferentes tipos de sensores fueron usados debido a restricciones logísticas. Ambos tipos de sensores fueron calibrados para las condiciones locales en laboratorio. El método de calibración usado fue similar al usado por Blume, Zehe, & Bronstert (2009) para suelos de cenizas volcánicas de los Andes Chilenos. De esta manera, se obtuvieron ecuaciones para los sensores 5TE del horizonte Ah a 5 y 45 cm en las posiciones A, M y B de la ladera (Ecu. 1), para los sensores 10HS, localizados en las tres posiciones de la ladera a 20 cm en el horizonte Ah (Ecu. 2) y para los sensores 5TE del horizonte C a 75 cm (Ecu. 3). Los coeficientes de determinación (r^2) obtenidos fueron de 0.98, 0.99 y 0.94 para las Ecu. 1, 2 y 3, respectivamente, en donde *raw counts* corresponde a los valores medidos en el sensor.

$$\theta \text{ (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = 2.23 * 10^{-11} * (\text{raw counts})^3 - 1.39 * 10^{-7} * (\text{raw counts})^2 + 3.87 * 10^{-4} * \text{raw counts} + 0.3 \quad (1)$$

$$\theta \text{ (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = 7.9 * 10^{-7} * (\text{raw counts})^2 - 1.56 * 10^{-3} * \text{raw counts} + 1.47 \quad (2)$$

$$\theta \text{ (cm}^3 \text{ cm}^{-3}\text{)} = 4 * 10^{-8} * \text{raw counts} - 0.14 \quad (3)$$

La lluvia, la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del viento y la radiación solar se registraron continuamente en la estación meteorológica (P1) ubicada a 3,962 msnm, a unos 2 km de la ladera. Estos datos se registraron en intervalos de 5 minutos. La lluvia fue monitoreada usando un pluviógrafo de balancín (Texas TE525MM) con una resolución de 0.1 mm. La temperatura del aire y la humedad relativa se midieron usando una sonda Campbell Scientific CS-215. Se midió la velocidad del viento utilizando un anemómetro Met-One 034B Windset, y la radiación solar mediante un piranómetro Campbell Scientific CS300 fabricado por Apogee Instruments (Córdova, Carrillo-Rojas, Crespo, Wilcox, & Céleri, 2015). La evapotranspiración de referencia (ET_o) se calculó por medio del método de Penman-Monteith (FAO 56) (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998).

2.4. Selección de eventos de lluvia y estados de humedad

En base al criterio de tiempo mínimo entre eventos (Dunkerley, 2008), definido como el lapso de tiempo mínimo sin lluvia entre dos eventos consecutivos, las series temporales de θ se separaron para cada evento de lluvia. Debido a la frecuente ocurrencia de lluvia en el Páramo a lo largo del año (Padrón *et al.*, 2015), un lapso de tiempo de 6 horas fue seleccionado para la obtención de eventos independientes (Fig. 2). Según Lozano-Parra, Schnabel, & Ceballos-Barbancho (2015), el aumento de θ , utilizando sensores de capacitancia, puede deberse tanto a

la precipitación o a el ruido del instrumento de medición, por tanto, se consideró un umbral mínimo de variación de $0.003 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ entre la humedad inicial (θ_{ini}) y la máxima generada durante el evento (θ_{max}), considerando que la exactitud en las mediciones contenido volumétrico reportada por el fabricante es de 0.3%. Además, se consideraron eventos en los cuales exista información para las tres posiciones topográficas y cuatro profundidades diferentes dentro de la ladera.

El cambio máximo en el contenido de humedad del suelo ($\Delta\theta_{max} = \theta_{max} - \theta_{ini}$) se utilizó para representar el grado de respuesta de humedad del suelo durante los eventos de lluvia (Zhu, Nie, Zhou, Liao, & Li, 2014), en cada posición topográfica y profundidad de la ladera (Fig. 2). Con el fin de evaluar posibles influencias de las características de los eventos en $\Delta\theta_{max}$, se calculó el volumen, duración e intensidad. Para evaluar la influencia de las condiciones meteorológicas previas, con respecto a $\Delta\theta_{max}$, fueron consideradas la lluvia y la evapotranspiración de referencia (ET_o) acumuladas en las 12 horas y 1-5-10-15 días previos al evento (Tabla 2).

Debido a que la respuesta de θ está altamente influenciada por condiciones de humedad antecedentes, estas han sido usadas en varios ecosistemas para definir estados de humedad (Gómez-Plaza, Alvarez-Rogel, Albaladejo, & Castillo, 2000; Lozano-Parra *et al.*, 2015). Por tanto, en este estudio, tres condiciones o estados de humedad antecedente fueron definidos en función de curvas de frecuencia de no-excedencia de θ de los sensores localizados a 5 cm de profundidad en la ladera. En este sentido se definieron: el estado húmedo (EH), en el cual los valores de θ oscilaron entre θ_{max} y θ_{90} (frecuencia de no-excedencia del 90% de los valores de θ); el estado intermedio (EI), en donde los valores de θ oscilaron entre θ_{90} y θ_{25} (frecuencia de no-excedencia del 25% de los valores de θ); y el estado seco (ES), en donde los valores estuvieron por debajo de θ_{25} (Fig. 3).

2.5. Análisis estadístico

Para identificar los factores que controlan $\Delta\theta_{max}$, durante los eventos de lluvia en las diferentes posiciones topográficas y profundidades monitoreadas, se realizó un análisis no paramétrico de correlación de Spearman (ρ) entre $\Delta\theta_{max}$ versus las características de los eventos y las variables meteorológicas antecedentes. Esto, debido a que algunas de las variables de respuesta, y las variables de predicción, no mostraron una distribución normal al usar la prueba de Kolmogorov-Smirnov. La significancia estadística de la correlación se evaluó usando una prueba F a un nivel de significancia (p) de 0.05. Adicionalmente, se realizó un análisis de los posibles umbrales de respuesta (t) entre las variables correlacionadas significativamente con $\Delta\theta_{max}$. Este análisis se realizó mediante la exploración visual de los diagramas de dispersión, generados entre cada variable de predicción versus $\Delta\theta_{max}$. Todos los análisis de los datos meteorológicos y de humedad del suelo fueron llevados a cabo utilizando la versión R2014a del software matemático MATLAB.

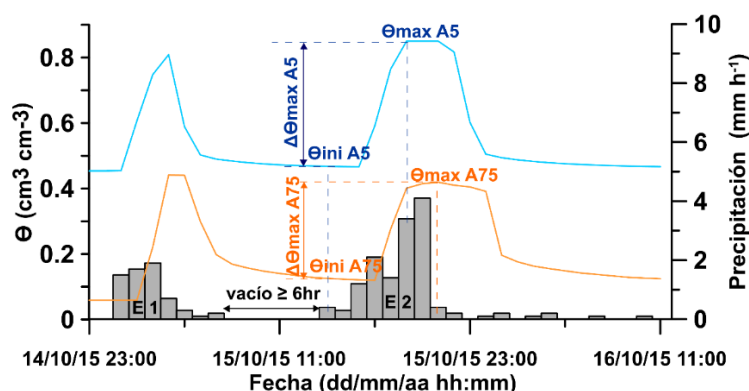


Figura 2. Respuesta máxima de la humedad del suelo ($\Delta\theta_{\max}$), humedad inicial (θ_{ini}) y humedad máxima ($\theta_{\max}$) en la posición alta (A) a dos profundidades (5 y 75 cm) durante dos eventos consecutivos de lluvia (E1 y E2 en la figura) monitoreados del 14 al 16 de octubre de 2015 en la ladera experimental.

Tabla 2. Características meteorológicas, y de humedad, medidas para cada uno de los eventos de lluvia monitoreados durante el período abril de 2015 a enero de 2017.

Símbolo	Descripción	Unidad
Vol	Volumen total del evento de lluvia	mm
Dur	Duración total del evento de lluvia	h
Int	Intensidad promedio durante el evento de lluvia	mm h ⁻¹
Ap _j	Precipitación antecedente (mm) de j (j = 12 h, 1, 5, 10 o 15 días)	mm
AET _o _j	ET de referencia antecedente (mm) de j (j = 12 h, 1, 5, 10 o 15 días)	mm
$\theta_{\text{ini}l_x}$	Humedad inicial del suelo justo antes del inicio del evento en la posición l (l = A, M o B) y profundidad x (x = 5, 20, 45 o 75 cm)	cm ³ cm ⁻³
$\Delta\theta_{\max l_x}$	Cambio máximo de humedad del suelo durante un evento de lluvia en la posición l y la profundidad x	cm ³ cm ⁻³

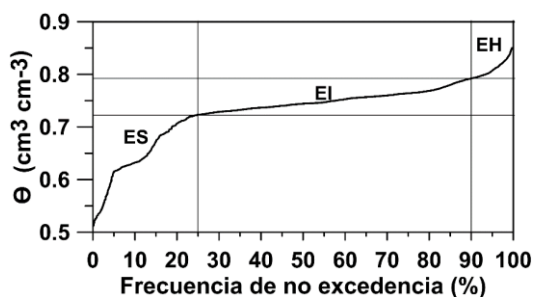


Figura 3. Curva de duración de θ del sensor ubicado en la posición media, a 5 cm de profundidad (M5). En la figura se representa los estados de humedad definidos, estado húmedo (EH), estado intermedio (EI), y estado seco (ES).

3. RESULTADOS

3.1. Características de los eventos de precipitación

Se identificaron un total de 72 eventos de lluvia durante el período de estudio, desde abril de 2015 a enero de 2017. Estos incluyeron 17 eventos durante ES, 36 eventos durante EI y 19 eventos durante EH. Los valores promedio, máximo y mínimo de las variables meteorológicas (Tabla 3) evidenciaron que la duración de los eventos para todos los estados de humedad es similar (9.6, 10.7 y 10.2 horas, en promedio, para ES, EI y EH, respectivamente). Durante los eventos ES, los

volúmenes precipitados (Vol) así como la intensidad (Int) mostraron los valores más altos, en donde el 50% de los eventos excedieron 10 mm de Vol y 75% excedieron 1 mm h⁻¹ de Int. Mientras que, durante EI y EH, el 80% de los eventos no superaron los 10 mm de Vol y el 85 % de los eventos del EH no superaron una Int de 1 mm h⁻¹.

A pesar de que el Vol e Int de los eventos del ES son generalmente los más altos, las condiciones de precipitación antecedente son las más bajas y las demandas antecedentes de ETo son las más altas (Tabla 3). Estas tendencias son opuestas para los eventos del EH. Por otra parte, valores intermedios de las condiciones antecedentes de precipitación y ETo se encontraron para los eventos del EI.

3.2. Cambios máximos de humedad del suelo durante diferentes estados de humedad

Los valores de $\Delta\theta_{\max}$ obtenidos en los eventos de precipitación, durante los diferentes estados de humedad, en todas las posiciones topográficas y profundidades de la ladera, se resumen en la Tabla 4.

Durante el ES en donde las condiciones antecedentes de humedad fueron las menores, los $\Delta\theta_{\max}$ obtenidos fueron generalmente los más altos en todas las posiciones de ladera (Tabla 4). Durante este estado se alcanzó el punto de saturación en B5 durante un evento registrado el 29-01-2017, en donde se obtuvo el máximo volumen precipitado del estudio: 32.3 mm, con una intensidad de 1 mm h⁻¹.

Tabla 3. Valores medios, máximos y mínimos de las características de los eventos y variables meteorológicas durante el estado seco, intermedio y húmedo desde abril de 2015 a enero de 2017. * Los valores entre paréntesis indican el número de eventos monitoreados en cada estado de humedad. Ap_x = precipitación antecedente (mm) de x ($x = 12$ h, 1, 5, 10 o 15 días). AET_{0x} = evapotranspiración de referencia antecedente (mm) de x ($x = 12$ h, 1, 5, 10 o 15 días). Las abreviaturas y unidades se muestran en la Tabla 2.

	Estado seco *(17)			Estado intermedio *(36)			Estado húmedo *(19)		
	Media	Max	Min	Media	Max	Min	Media	Max	Min
Vol	10.2	32.3	2.7	6.8	20.6	1.8	5.7	14.3	1.5
Dur	9.6	33.0	2.0	10.7	36.0	2.0	10.2	28.0	2.0
Int	1.4	4.6	0.3	0.9	2.9	0.2	0.7	2.9	0.2
Ap_{12h}	0.7	3.3	0.0	0.7	4.9	0.0	1.3	8.2	0.0
Ap_{1d}	3.1	4.0	0.0	5.7	16.6	0.0	12.5	31.6	0.1
Ap_{5d}	9.1	27.5	0.3	15.5	31.9	1.3	23.2	42.9	8.7
Ap_{10d}	16.0	48.7	0.6	27.0	56.0	3.9	40.5	74.9	19.5
Ap_{15d}	27.5	69.8	6.0	38.8	80.7	12.7	54.8	79.9	31.8
AET_{012h}	1.4	3.1	0.0	0.9	2.6	0.0	0.6	2.2	0.0
AET_{01d}	3.9	5.8	1.7	3.1	6.0	1.0	2.3	4.7	1.2
AET_{05d}	10.6	14.8	7.1	8.1	14.6	3.1	6.9	13.7	3.9
AET_{010d}	21.2	31.2	14.5	16.5	23.7	10.3	14.9	23.4	8.9
AET_{015d}	29.8	40.8	22.4	24.4	34.8	18.4	22.9	33.5	15.7

Tabla 4. Valores medios, máximos y mínimos de los $\Delta\theta_{max}$ obtenidos en los eventos monitoreados durante los estados seco, húmedo e intermedio para el período de abril de 2015 a enero de 2017 en cada posición topográfica dentro la ladera. * Los valores entre paréntesis indican el número de eventos para cada uno de los estados de humedad. En esta tabla: d = $\Delta\theta_{max}$; A, M y B, las posiciones altas, media y baja de la ladera; y 5, 20, 45 y 75, las profundidades del suelo (cm) en las que se realizó el análisis.

	Estado seco *(17)			Estado intermedio *(36)			Estado húmedo *(19)		
	Media	Max	Min	Media	Max	Min	Media	Max	Min
dA5	0.119	0.395	0	0.153	0.403	0	0.194	0.398	0
dA20	0.003	0.010	0	0.003	0.006	0	0.002	0.005	0
dA45	0.011	0.043	0	0.010	0.030	0	0.010	0.025	0
dA75	0.109	0.431	0	0.111	0.384	0	0.147	0.328	0
dM5	0.045	0.165	0	0.024	0.098	0	0.017	0.054	0
dM20	0.004	0.015	0	0.003	0.010	0	0.002	0.006	0
dM45	0.026	0.165	0	0.016	0.149	0	0.014	0.112	0
dM75	0.015	0.073	0	0.006	0.038	0	0.004	0.031	0
dB5	0.024	0.073	0	0.015	0.040	0	0.005	0.033	0
dB20	0.004	0.013	0	0.003	0.008	0	0.002	0.007	0
dB45	0.018	0.083	0	0.030	0.099	0	0.034	0.103	0
dB75	0.052	0.229	0	0.055	0.228	0	0.050	0.259	0

Tabla 5. Coeficientes de correlación de Spearman (ρ) y umbrales (t) encontrados entre $\Delta\theta_{max}$ versus las características de los eventos y variables meteorológicas en cada ubicación topográfica y profundidad dentro de la ladera experimental, durante los estados de humedad seco (ES), intermedio (EI) y húmedo (EH). En esta tabla: d = $\Delta\theta_{max}$; A, M y B, las posiciones altas, media y baja dentro de la ladera; 5, 20, 45 y 75, las profundidades del suelo (cm) en las que se realizó el análisis (los valores en negrita fueron significativos en la prueba F a un nivel de confianza 0.05. (* La correlación entre $\Delta\theta_{max}$ y θ_{ini} también se incluyó en esta tabla).

ES	Vol		Int		Ap_{5d}		AET_{015d}		θ_{ini}	
	ρ	t	ρ	t	ρ	t	ρ	T	ρ	t
dA5	0.91	8.4	0.79	1.2	0.00	0.3	-0.06	24.1	0.37	0.45
dA20	0.94	8.4	0.64	1.3	0.19	0.3	0.05	24.1	0.18	0.72
dA45	0.88	9.2	0.66	1.3	0.04	0.3	0.18	24.1	-0.03	0.65
dA75	0.82	10.1	0.59	1.3	0.06	0.3	0.19	24.1	0.18	0.06
dM5	0.78	4.5	0.29	0.3	0.24	0.3	0.00	24.1	-0.31	0.61
dM20	0.95	4.5	0.51	0.3	0.08	0.3	0.04	24.1	-0.11	0.72
dM45	0.88	6.2	0.58	1.1	0.09	0.3	0.20	24.1	-0.13	0.53
dM75	0.88	10.1	0.60	1.1	0.07	0.3	0.17	24.1	-0.25	0.32
dB5	0.82	2.8	0.35	0.4	0.20	0.3	-0.08	24.1	-0.37	0.76
dB20	0.90	2.8	0.46	0.4	0.06	0.3	-0.01	22.4	-0.21	0.72
dB45	0.88	8.9	0.63	1.2	0.17	0.3	-0.05	24.1	0.09	0.70
dB75	0.89	9.7	0.44	1.2	-0.03	0.3	0.14	24.1	-0.36	0.34

EI										
dA5	0.82	3.3	0.57	0.3	0.31	2.1	0.13	18.4	0.27	0.45
dA20	0.83	3.3	0.55	0.3	0.24	2.1	0.15	18.4	-0.01	0.73
dA45	0.85	3.3	0.53	0.3	0.24	2.1	0.17	18.4	0.04	0.66
dA75	0.87	5.3	0.50	0.3	0.30	2.1	0.07	18.4	0.28	0.06
dM5	0.75	1.8	0.38	0.2	0.15	1.7	0.08	18.4	-0.03	0.73
dM20	0.93	1.8	0.59	0.3	0.09	1.7	0.28	18.4	0.04	0.72
dM45	0.89	3.2	0.57	0.3	0.27	2.1	0.19	18.4	0.09	0.54
dM75	0.85	3.2	0.35	0.3	0.24	6.5	0.24	18.4	0.01	0.37
dB5	0.65	2.7	0.57	0.2	0.25	2.1	0.11	18.4	-0.48	0.78
dB20	0.84	1.8	0.66	0.3	0.17	2.1	0.37	18.4	-0.07	0.73
dB45	0.83	1.8	0.54	0.3	0.27	2.1	0.11	18.4	-0.03	0.71
dB75	0.65	2.7	0.57	0.2	0.25	2.1	0.11	18.4	-0.48	0.78
EH										
dA5	0.84	3.2	0.48	0.3	0.15	11	0.22	15.7	-0.23	0.46
dA20	0.89	3.2	0.69	0.3	-0.01	11	0.42	15.7	-0.28	0.73
dA45	0.91	3.3	0.56	0.3	0.06	11	0.37	15.7	0.26	0.67
dA75	0.82	3.3	0.41	0.3	0.17	11	0.29	15.7	0.12	0.08
dM5	0.83	1.7	0.44	0.2	-0.32	8.7	0.32	15.7	0.08	0.79
dM20	0.87	1.0	0.60	0.4	-0.06	11	0.44	15.7	-0.35	0.73
dM45	0.88	3.2	0.63	0.4	0.07	11	0.36	15.7	0.37	0.56
dM75	0.59	1.7	0.18	0.4	-0.09	11	0.17	15.7	0.27	0.38
dB5	0.88	2.1	0.63	0.3	0.62	8.7	0.59	15.7	-0.89	0.82
dB20	0.91	2.1	0.54	0.4	0.20	11	0.37	15.7	0.01	0.73
dB45	0.79	2.7	0.36	0.4	0.03	11	0.24	15.7	-0.20	0.71
dB75	0.73	1.3	0.36	0.4	-0.05	11	0.31	15.7	-0.02	0.41

Durante el EI se obtuvieron valores intermedios de $\Delta\theta_{\max}$ con respecto al ES y el EH en todas las posiciones de la ladera (Tabla 4). De los 36 eventos analizados, 13 de estos alcanzaron el punto de saturación en B5, con volúmenes precipitados entre 6 y 20 mm y con intensidades que oscilaron entre 0.3 y 2.9 mm h⁻¹. Mientras que, durante el EH se obtuvieron los valores más bajos de $\Delta\theta_{\max}$ en todas las posiciones de la ladera (excepto en las posiciones A5, A75 y B45 en donde se obtuvieron los valores más altos). En este estado se alcanzó el punto de saturación en 16 de los 19 eventos analizados en la posición B5.

Independientemente del estado de humedad analizado los $\Delta\theta_{\max}$ obtenidos en todas las posiciones topográficas a 20 cm de profundidad fueron los más bajos y con valores similares, con $\Delta\theta_{\max}$ entre 0.002 y 0.004 cm³ cm⁻³ (Tabla 4) durante cualquiera de los tres estados de humedad analizados.

3.3. Factores que controlan el cambio máximo de humedad del suelo

Los coeficientes de correlación de Spearman (ρ) entre $\Delta\theta_{\max}$, con las características de los eventos y las variables meteorológicas, se reportan en la Tabla 5. Los resultados obtenidos mostraron que los valores de ρ entre $\Delta\theta_{\max}$ y el volumen precipitado, durante el evento (Vol), fueron estadísticamente significativos ($p < 0.05$, valores de ρ en negrita en la Tabla 5) y superiores a 0.72 para todos los estados de humedad en todas las posiciones topográficas y todas las profundidades, excepto en B5 durante el EI ($\rho = 0.65$) y en M75 durante el EH ($\rho = 0.59$). Con respecto a la intensidad de los eventos (Int), los valores de ρ durante el ES fueron superiores a 0.59 ($p < 0.05$) en la parte A de la ladera. En las partes M y B, en donde la correlación fue estadísticamente significativa,

los valores de ρ variaron entre 0.51 y 0.63 (no existió correlación significativa entre $\Delta\theta_{\max}$ e Int en las posiciones M5, B5, B20 y B75). Durante el EI los valores de ρ fueron superiores a 0.50 ($p < 0.05$), excepto en M5 y M75. Mientras que, durante el EH, los valores de ρ fueron mayores a 0.48 ($p < 0.05$), la correlación no fue estadísticamente significativa en A75, M5, M75, B45 y B75.

Los valores de ρ obtenidos con las condiciones meteorológicas antecedentes, como la precipitación previa de 5 días (Ap_{5d}), la ETo antecedente de 15 días (AET_{015d}) así como con θ_{ini} , tuvieron correlación estadísticamente significativa únicamente en la posición B5 durante el EH (Tabla 5). Por otra parte, las demás variables relacionadas con las condiciones meteorológicas antecedentes no tuvieron correlación estadística significativa (ρ entre -0.47 y 0.46 y $p > 0.06$; correlaciones no incluidas en la Tabla 5 por brevedad, estos valores pueden observarse en el anexo del artículo).

3.4. Umbrales de la relación entre el cambio máximo de humedad del suelo versus las características del evento y variables meteorológicas

La variación de los umbrales (t) obtenidos del análisis de los diagramas de dispersión entre las variables meteorológicas y características de los eventos que controlan $\Delta\theta_{\max}$, se reportan en la Tabla 5. Los resultados obtenidos mostraron que únicamente los umbrales del volumen precipitado del evento (Vol) revelaron una respuesta umbral bien definida durante el ES, en cualquier posición topográfica (Fig. 4). Durante EI y EH, en cualquier posición topográfica, los umbrales de Vol, así como los umbrales del resto de factores meteorológicos: Int, Ap_{5d} y AET_{015d} (durante cualquier estado), mostraron una respuesta menos clara.

La Figura 4 representa la variación de los umbrales, utilizando los diagramas de dispersión, en donde se observan los $\Delta\theta_{\max}$ como una función del Vol durante los diferentes estados de humedad. En general, se revelaron tres formas de variación de los valores del umbral, las cuales fueron: (i) en una determinada posición topográfica, y durante un determinado estado de humedad, los umbrales incrementaron al aumentar la profundidad desde los 5 cm hacia los 75 cm de profundidad; (ii) durante un determinado estado de humedad y a una misma profundidad, los umbrales más altos correspondieron a la parte A de la ladera y los más bajos a la parte B; y (iii) en una determinada posición topográfica, los umbrales más altos correspondieron al ES y los más bajos al EH. Dentro de la variación de umbrales (i) se identificó que durante un

determinado estado de humedad y en una determinada parte de la ladera, el umbral más bajo de Vol, Int y Ap_{5d} correspondió a la capa de suelo menos profundo (5 cm) y aumentó para obtener la respuesta de humedad en el estrato de suelo más profundo (75 cm). Por ejemplo, durante ES, en la parte A, el umbral de Vol aumentó, desde los 5 cm a los 75 cm de profundidad, de 8.4 mm a 10.1 mm, de 4.5 a 10.1 mm en la parte M y de 2.8 a 9.7 mm en la parte B. Mientras que, el umbral de Int aumentó de 1.2 a 1.3 mm h⁻¹ en la parte A, de 0.3 a 1.1 mm h⁻¹ en la parte M y de 0.4 a 1.2 mm h⁻¹ en la parte B (Tabla 5). No obstante, estas tendencias no se presentaron para los umbrales de Vol durante el EI en la posición B20 y B45 y durante el EH en las posiciones M20, M75 y B75

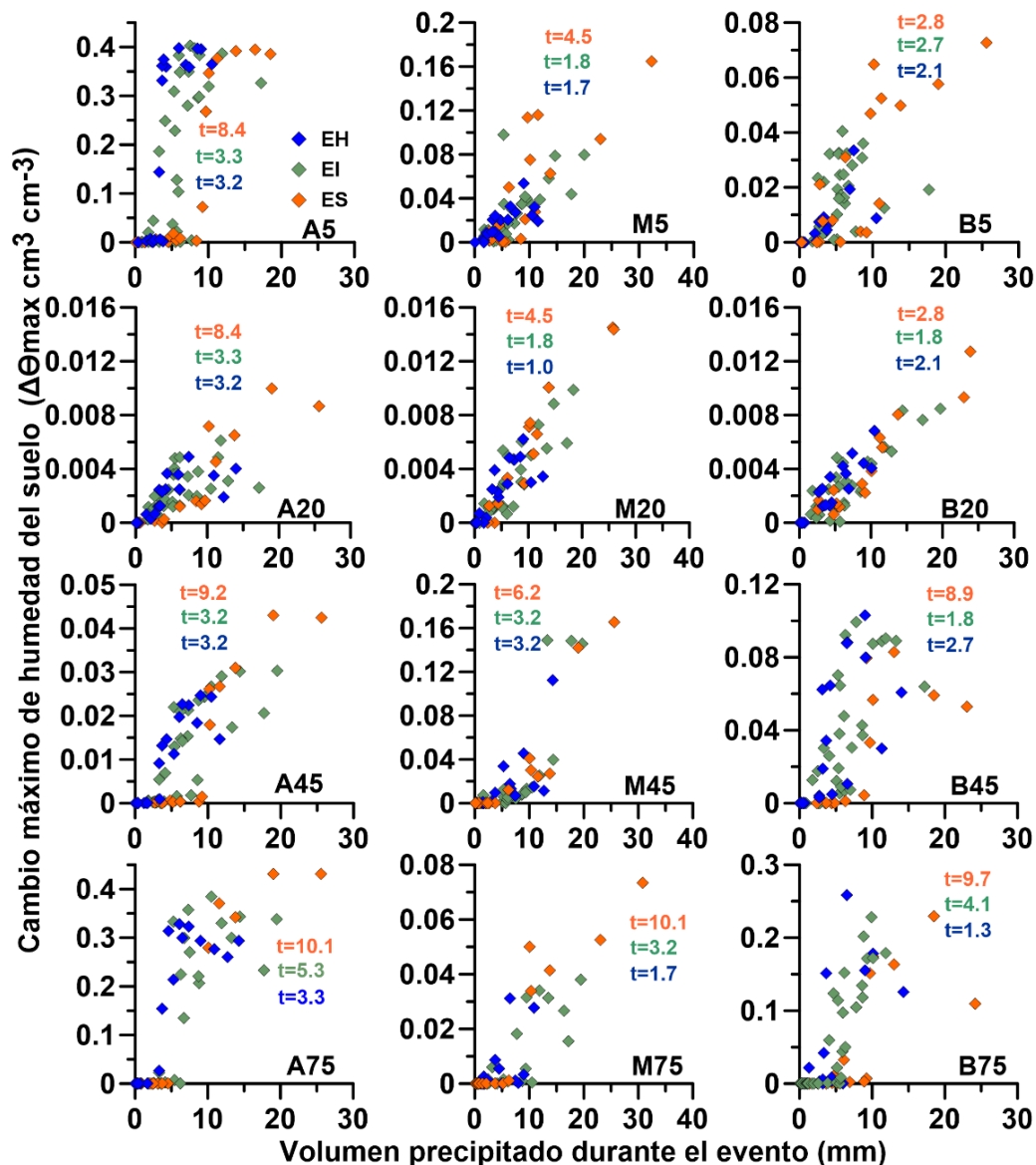


Figura 4. Cambio máximo de humedad del suelo versus el volumen del evento precipitado durante los diferentes estados de humedad, en cada posición topográfica y profundidad dentro de la ladera. En esta figura: t = umbrales; A, M y B, son la posición alta, media y baja de la ladera; 5, 20, 45 y 75 las profundidades del suelo (cm) dentro de la ladera, en las cuales se llevó a cabo el análisis. En la sub-figura A5 se denota el color usado para diferenciar el ES (tomate), EI (verde) y EH (azul).

Por otra parte, la variación de umbrales (ii) reveló qué durante un determinado estado de humedad, los umbrales del Vol e Int disminuyeron en función del avance hacia las posiciones topográficas inferiores de la ladera. De esta manera, en la misma profundidad de suelo, los umbrales más altos correspondieron a la parte A y los más bajos a la parte B de la ladera (por ejemplo, durante el ES los umbrales de Vol, a 5 cm de profundidad, disminuyeron desde 8.4 mm en A5 a 2.8 mm en B5, y en Int disminuyeron desde 1.2 mm hr⁻¹ en A5 a 0.4 mm hr⁻¹ en B5). Sin embargo, durante EI y EH, los umbrales de Vol fueron más bajos en la posición M de la ladera, específicamente en las profundidades de 5 y 20 cm (1.8 mm); también, durante EI se encontró el valor umbral más bajo (3.2 mm) en la posición M a 75 cm. Mientras que, durante el ES se obtuvieron los umbrales más bajos de Int (0.3 a 1.1 mm hr⁻¹) en todas las profundidades de la parte M. Además, los umbrales de AET_{0.15d} no variaron en función del avance desde la parte A hacia la B de la ladera, mientras que la variación de umbrales (iii) identificó que los valores de umbral más altos se obtuvieron durante el ES y los más bajos durante EH para los factores Vol, Int y AET_{0.15d}. Por ejemplo, en A5 los umbrales disminuyeron al pasar de ES a EH desde 8.4 a 3.2 mm en el Vol, desde 1.3 a 0.3 mm hr⁻¹ en la Int y desde 24.1 a 15.7 mm en la AET_{0.15d} (Tabla 5). Estas tendencias fueron opuestas para los umbrales de los factores Ap_{5d} y θ_{ini} en todas las posiciones y profundidades dentro de la ladera. Por ejemplo, en M5 el valor de umbral aumentó al pasar del ES al EH desde 0.3 a 8.7 mm en la Ap_{5d} y desde 0.61 a 0.79 en la θ_{ini} (Tabla 5).

4. DISCUSIÓN

4.1. Controladores de la respuesta máxima de humedad del suelo en diferentes posiciones topográficas de la ladera y bajo diferentes estados de humedad

La respuesta de $\Delta\theta_{max}$ durante eventos de precipitación reveló que, en las diferentes posiciones topográficas, dichos cambios fueron controlados principalmente por Vol e Int, sin importar los estados de humedad (Tabla 5). Esta observación fue consistente con el estudio de Zhu *et al.* (2014) en los $\Delta\theta_{max}$ de una región subtropical de China, bajo condiciones húmedas o secas. De igual manera, Albertson & Kiely (2001) y Liu *et al.* (2015) contrastaron estos resultados en praderas de zonas húmedas y áridas, respectivamente. Por otra parte, los valores bajos de correlación (en ningún caso con significancia estadística) obtenidos con las variables meteorológicas antecedentes restantes, no mostraron influencia en $\Delta\theta_{max}$ a escala de eventos de precipitación. Estos resultados fueron similares a los encontrados por Lozano-Parra *et al.* (2015) quienes no obtuvieron indicios de ser factores influyentes del cambio de humedad en praderas de clima Mediterráneo en España. Sin embargo estos factores han revelado mayor influencia en estudios que consideran escalas temporales semanales o mensuales (Crockford & Richardson, 2000).

No obstante, la importancia de los controladores de $\Delta\theta_{max}$, revelaron una variación de acuerdo con el estado de humedad y a la posición topográfica analizada. Estudios en varios ecosistemas han demostrado que en diferentes posiciones de la ladera existe variación de la humedad del suelo y su respuesta a la lluvia así como los flujos

preferenciales, que a su vez se desencadenan por la cantidad, intensidad de la lluvia y las condiciones antecedentes de humedad (Graham & Lin, 2011; Hardie *et al.*, 2011; Lin & Zhou, 2008; Wickenkamp, Huisman, Bogaen, Lin, & Vereecken, 2016). De esta manera, bajo cualquier estado de humedad, en la parte A de la ladera se notó un claro control del volumen precipitado (Tabla 5). Esta observación fue consistente con el estudio de Kim (2009) quien determinó al volumen del evento como principal controlador de los cambios de humedad en la parte alta de una ladera de topografía empinada (45%). Por otra parte, las posiciones M y B de la ladera evidenciaron una disminución en la influencia del volumen precipitado (especialmente en las profundidades de 45 y 75 cm). Esto se puede atribuir a la conectividad hidrológica de ladera durante el estado intermedio o húmedo. A estas posiciones de la ladera Kim (2009) las denominó como la zona media, en donde se reveló una estabilidad a las respuestas a los eventos de lluvia durante los periodos seco y lluvioso, y la zona baja de la ladera como una zona de almacenamiento de agua del suelo, la cual corresponde a la parte B de nuestra ladera experimental.

4.2. Umbrales de lluvia e intensidad en la respuesta máxima de humedad del suelo en diferentes posiciones topográficas de la ladera y bajo diferentes estados de humedad

El análisis de umbrales reveló que en una determinada posición topográfica y durante un determinado estado de humedad, los valores umbral más bajos corresponden al estrato más cercano a la superficie (5 cm) y los valores umbral más altos corresponden al estrato de mayor profundidad (75 cm) (Tabla 5). Resultados similares fueron obtenidos por He, Zhao, Liu, & Chang (2012) en praderas subalpinas de regiones montañosas, en donde se demostró que el volumen precipitado necesario para generar respuesta en la humedad de suelo aumentó desde 15 mm a los 20 cm, 20 mm a los 40 cm, hasta 40 mm a los 60 cm de profundidad. De igual manera, Heisler-White, Knapp, & Kelly (2008) demostraron que los eventos de mayor volumen (en promedio 31.7 mm) permiten ganancia de humedad a mayores profundidades en el perfil del suelo, a diferencia de los eventos de bajo volumen precipitado (en promedio 21.1 mm) en praderas de clima semiárido.

Por otra parte, se observó que durante un determinado estado de humedad y a una misma profundidad, los umbrales más altos correspondieron a la parte A de la ladera y los más bajos a la parte B. Debido a que la ladera se encuentra más húmeda en la parte baja independientemente del estado de humedad (Fig. 4e). En laderas subtropicales con cobertura de prado y plantaciones de té, Zhu *et al.* (2014) encontraron similares hallazgos al evaluar la variación del almacenamiento (obtenidos de la multiplicación del contenido de humedad del suelo por el espesor del mismo), demostrando que en las partes altas fue necesario eventos mayores a 37 mm para generar cambios de almacenamiento entre 23 y 28 mm, mientras que, en las partes bajas eventos menores a 10 mm generaron cambios de almacenamiento mayores a 35 mm. No obstante, durante EI y EH se encontró que los umbrales más bajos en las profundidades de 5 y 20 cm correspondieron a la parte M de la ladera, lo que puede atribuirse a la mayor influencia de los flujos laterales desde A hacia M durante estos estados, así como a la altura del pajonal circundante en cada posición topográfica, que en la

parte M oscila entre 45 y 60 cm, mientras que en la B es superior a 90 cm (altura tomada en 10 m² de área circundante a cada posición de la ladera), generando un mayor umbral en la parte B para superar la intercepción generada en el pajonal más denso de esta posición.

Finalmente, con relación a los estados de humedad, en una misma posición topográfica se determinaron umbrales más altos durante el ES y más bajos durante el EH. Estos resultados fueron consistentes con los de Dusek & Vogel (2016), quienes usando un modelo numérico para evaluar las condiciones de saturación de una ladera, la intensidad y volumen del evento en la generación de flujo subsuperficial en praderas de *Calamagrostis* sp. demostraron que: (1) durante condiciones secas en la ladera (análogas al ES en el presente estudio), el umbral de volumen fue de 96 mm durante eventos con intensidades entre 1.04 y 1.62 mm hr⁻¹; (2) durante condiciones intermedias de saturación (análogas al EI), el umbral de volumen osciló entre 25 y 35 mm durante eventos con intensidades promedio entre 0.91 y 1.21 mm hr⁻¹; y (3) durante condiciones de saturación en la ladera (análogas al EH), el umbral de volumen osciló entre 0 y 12 mm durante eventos con intensidades entre 0.69 y 0.87 mm hr⁻¹. Además, en laderas subtropicales húmedas de pradera, Sarkar, Dutta, & Dubey (2015) demostraron que, durante condiciones secas de humedad antecedente, los eventos de precipitación menores a 35 mm no generan escorrentía superficial, la cual es común durante eventos en los cuales el volumen precipitado excede los 28 mm durante condiciones altas de humedad antecedente, contrastando la variación de umbrales atribuidas a los estados de humedad. A pesar de que el patrón de variación de umbrales fue consistente con nuestros hallazgos, los valores umbral fueron sustancialmente más altos que los umbrales de nuestro estudio. Lo que puede atribuirse a la alta capacidad de retención de agua en los suelos y la pendiente de nuestra ladera experimental (pF 0 entre 0.78 y 0.84 cm³ cm⁻³ y pendiente de 42%) en comparación a los estudios de Dusek & Vogel (2016) y Sarkar *et al.* (2015), en donde el pF 0 osciló entre 0.49 y 0.54 cm³ cm⁻³ y la pendiente entre 14 y 20%.

5. CONCLUSIONES

El análisis de respuesta máxima de cambios de humedad en la ladera experimental de pradera del Páramo húmedo Andino reveló que la parte alta de la ladera muestra mayor dinámica en respuesta a los eventos de lluvia, mientras que en la parte media y, sobre todo, en la parte baja, la respuesta es menos pronunciada debido a que las zonas más bajas reciben flujos provenientes de las partes alta y media, lo que contribuye a mantener humedades altas en todas las profundidades del suelo. La alta humedad sostenida sobre la capacidad de campo, del análisis a 20 cm del horizonte Ah, sugiere que a este estrato puede atribuirse la alta capacidad de almacenamiento y regulación del agua del Páramo Andino.

En relación con los controladores de la respuesta máxima de la humedad, durante el estado seco se obtuvo mayor influencia de la cantidad e intensidad de la precipitación (especialmente en la parte alta de la ladera). Mientras que durante el estado intermedio y húmedo se reveló una mayor influencia de las condiciones antecedentes de precipitación y evapotranspiración de los 5 y 15 días

previos, respectivamente. La influencia de cada factor contribuyó a un mejor entendimiento de la conectividad hidrológica en las laderas del Páramo Andino. No obstante, esta caracterización podría ser mejorada usando mediciones directas en zanjas al pie de ladera (o incluso por posición topográfica), ya que en este estudio se abordó una inferencia de estos flujos a través de la medición indirecta de la humedad del suelo.

Con respecto al análisis de variación de los umbrales de cantidad e intensidad del evento, se revelaron tres tendencias claramente marcadas: (i) la variación de los valores umbral en una determinada posición topográfica y durante un determinado estado de humedad, reveló un incremento en función del aumento de profundidad, desde los 5 cm hacia los 75 cm de profundidad; (ii) durante un determinado estado de humedad y a una misma profundidad, los umbrales más altos correspondieron a la parte alta de la ladera y los más bajos a la parte baja de la misma; y (iii) en una determinada posición topográfica, los umbrales más altos correspondieron al estado seco y los más bajos al estado húmedo. No obstante, esta caracterización podría ser mejorada usando mediciones directas en zanjas al pie de ladera (o incluso por posición topográfica), ya que en este estudio se abordó una inferencia de estos flujos a través de la medición indirecta de la humedad del suelo. Además, estudios complementarios para investigar la conectividad hidrológica en cada posición y profundidad de la ladera podrían realizarse por medio del uso de trazadores artificiales o hidrológicos naturales, los cuales han ofrecido un potencial para el análisis de rutas de generación de escorrentía y conectividad subsuperficial en estas regiones montañosas de los Andes (por ejemplo Correa *et al.*, 2017; Mosquera *et al.*, 2016).

Finalmente, al evaluar la dinámica hidrológica de subsuperficie para identificar los principales controladores y umbrales de esta respuesta en cada posición topográfica de la ladera, este estudio contribuye de manera relevante al esfuerzo por preservar y manejar de manera sostenible las praderas de los ecosistemas montañosos alto Andinos, que sufren afecciones en sus suelos (y por tanto a la generación de escorrentía) debido principalmente a la labranza y pastoreo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha llevado a cabo gracias al proyecto de investigación “Desarrollo de indicadores hidrológicos funcionales para la evaluación del impacto del cambio global en ecosistemas Andinos” financiado por la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SNESCYT) y la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca (DIUC). Además, los autores agradecen a ETAPA-EP y al Ministerio del Ambiente del Ecuador por la provisión de permisos para conducir este estudio en el Parque Nacional Cajas (N_ 002-SGA-2014-PNC-BD-VR), así como al equipo de monitoreo conformado por Juan Pesantez, Darío Zhiña, Franklin Marín y Jorge Ramón.

REFERENCIAS

- Albertson, J. D., & Kiely, G. (2001). On the structure of soil moisture time series in the context of land surface models. *Journal of Hydrology*, 243(1), 101-119. [http://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00405-4](http://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00405-4)
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 56. Available at <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm#Contents>
- Blanco, C. M. G., Gomez, V. M. B., Crespo, P., & Ließ, M. (2018). Spatial prediction of soil water retention in a Páramo landscape: Methodological insight into machine learning using random forest. *Geoderma*, 316, 100-114. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.002>
- Blume, T., Zehe, E., & Bronstert, A. (2009). Use of soil moisture dynamics and patterns at different spatio-temporal scales for the investigation of subsurface flow processes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 1215-1234.
- Buttle, J. M., Dillon, P. J., & Eerkes, G. R. (2004). Hydrologic coupling of slopes, riparian zones and streams: an example from the Canadian Shield. *Journal of Hydrology*, 287(1), 161-177. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.09.022>
- Buttle, J. M., & McDonald, D. J. (2002). Coupled vertical and lateral preferential flow on a forested slope. *Water Resources Research*, 38(5), 16-18. <http://doi.org/10.1029/2001WR000773>
- Buytaert, W., & Beven, K. (2010). Models as multiple working hypotheses : hydrological simulation of tropical alpine wetlands. *Hydrological Processes*, 25, 1784-1799. <http://doi.org/10.1002/hyp.7936>
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1), 53-72.
- Buytaert, W., & De Bièvre, B. (2012). Water for cities: The impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes. *Water Resources Research*, 48(8), 1-13. <http://doi.org/10.1029/2011WR011755>
- Buytaert, W., Iñiguez V., & De Bièvre, B. (2007). The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean paramo. *Forest Ecology and Management*, 251(1-2), 22-30. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.035>
- Buytaert, W., Wyseure, G., De Bièvre, B., & Deckers, J. A. (2005). The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in South Ecuador. *Hydrological Processes*, 19(20), 3985-3997.
- Céleri, R., & Feyen, J. (2009). The hydrology of tropical andean ecosystems: Importance , knowledge status and perspectives. *Mountain Research and Development*, 29(4), 350-355. <https://doi.org/10.1659/mrd.00007>
- Celleri, R., Willems, P., Buytaert, W., & Feyen, J. (2007). Space-time rainfall variability in the Paute basin, Ecuadorian Andes. *Hydrological Processes*, 21(24), 3316-3327. <http://doi.org/10.1002/hyp.6575>
- Cobos, D. R., & Chambers, C. (2010). *Calibrating ECH2O soil moisture sensors. Application Note*. Decagon Devices, Pullman, WA, USA. Disponible en <http://www.onsetcomp.com/files/15922-C%20Calibrating%20ECH2O%20Soil%20Moisture%20Sensors.pdf>
- Córdova, M., Carrillo-Rojas, G., Crespo, P., Wilcox, B., & Céleri, R. (2015). Evaluation of the Penman-Monteith (FAO 56 PM) method for calculating reference evapotranspiration using limited data. *Mountain Research and Development*, 35(3), 230-239.
- Correa, A., Windhorst, D., Tetzlaff, D., Crespo, P., Céleri, R., Feyen, J., & Breuer, L. (2017). Temporal dynamics in dominant runoff sources and flow paths in the Andean Páramo. *Water Resources Research*, 53(7), 5998-6017. <http://doi.org/10.1002/2016WR020187>
- Crespo, P., Céleri, R., Buytaert, W., Feyen, J., Iñiguez, V., Borja, P., & Bievre, B. (2010). *Land use change impacts on the hydrology of wet Andean páramo ecosystems*. IAHS-AISH publication 2010. Disponible en dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/22092/1/scopus.135.pdf
- Crespo, P. J., Feyen, J., Buytaert, W., Bücker, A., Breuer, L., Frede, H.-G., & Ramírez, M. (2011). Identifying controls of the rainfall-runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador). *Journal of Hydrology*, 407(1-4), 164-174. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.021>
- Crockford, R. H., & Richardson, D. P. (2000). Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes*, 14(16-17), 2903-2920. [http://doi.org/10.1002/1099-1085\(200011/12\)14:16/17<2903::AID-HYP126>3.0.CO;2-6](http://doi.org/10.1002/1099-1085(200011/12)14:16/17<2903::AID-HYP126>3.0.CO;2-6)
- Dunkerley, D. (2008). Identifying individual rain events from pluviograph records: a review with analysis of data from an Australian dryland site. *Hydrological Processes*, 22(26), 5024-5036. <https://doi.org/10.1002/hyp.7122>
- Dusek, J., & Vogel, T. (2016). Hillslope-storage and rainfall-amount thresholds as controls of preferential stormflow. *Journal of Hydrology*, 534, 590-605. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.047>
- Famiglietti, J. S., Rudnicki, J. W., & Rodell, M. (1998). Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. *Journal of Hydrology*, 210(1), 259-281. [http://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00187-5](http://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00187-5)
- Gómez-Plaza, A., Alvarez-Rogel, J., Albaladejo, J., & Castillo, V. M. (2000). Spatial patterns and temporal stability of soil moisture across a range of scales in a semi-arid environment. *Hydrological Processes*, 14(7), 1261-1277. [http://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(200005\)14:7<1261::AID-HYP40>3.0.CO;2-D](http://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(200005)14:7<1261::AID-HYP40>3.0.CO;2-D)
- Graham, C. B., & Lin, H. S. (2011). Controls and Frequency of Preferential Flow Occurrence: A 175-Event Analysis All rights reserved. No part of this periodical may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or any. *Vadose Zone Journal*, 10, 816-831.

- <http://doi.org/10.2136/vzj2010.0119>
- Graham, C. B., Woods, R. A., & McDonnell, J. J. (2010). Hillslope threshold response to rainfall: (1) A field based forensic approach. *Journal of Hydrology*, 393(1), 65-76. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.12.015>
- Grayson, R. B., Western, A. W., & Chiew, F. H. S. (1997). Preferred states in spatial soil moisture patterns. *Water Resources Research*, 33(12), 2897-2908.
- Gwak, Y., & Kim, S. (2017). Factors affecting soil moisture spatial variability for a humid forest hillslope. *Hydrological Processes*, 31(2), 431-445. <http://doi.org/10.1002/hyp.11039>
- Hardie, M. A., Cotching, W. E., Doyle, R. B., Holz, G., Lisson, S., & Mattern, K. (2011). Effect of antecedent soil moisture on preferential flow in a texture-contrast soil. *Journal of Hydrology*, 398(3), 191-201. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.008>
- He, Z., Zhao, W., Liu, H., & Chang, X. (2012). The response of soil moisture to rainfall event size in subalpine grassland and meadows in a semi-arid mountain range: A case study in northwestern China's Qilian Mountains. *Journal of Hydrology*, 420-421, 183-190. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.056>
- Heisler-White, J. L., Knapp, A. K., & Kelly, E. F. (2008). Increasing precipitation event size increases aboveground net primary productivity in a semi-arid grassland. *Oecologia*, 158(1), 129-140. <http://doi.org/10.1007/s00442-008-1116-9>
- Ivanov, V. Y., Fatichi, S., Jenerette, G. D., Espeleta, J. F., Troch, P. A., & Huxman, T. E. (2010). Hysteresis of soil moisture spatial heterogeneity and the "homogenizing" effect of vegetation. *Water Resources Research*, 46(9), 1-15. <https://doi.org/10.1029/2009WR008611>
- Jost, G., Schume, H., & Hager, H. (2004). Factors controlling soil water-recharge in a mixed European beech (*Fagus sylvatica* L.)-Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] stand. *European Journal of Forest Research*, 123(2), 93-104. <https://doi.org/10.1007/s10342-004-0033-7>
- Kim, S. (2009). Characterization of soil moisture responses on a hillslope to sequential rainfall events during late autumn and spring. *Water Resources Research*, 45(9), 1-15. <http://doi.org/10.1029/2008WR007239>
- Lawrence, J. E., & Hornberger, G. M. (2007). Soil moisture variability across climate zones. *Geophysical Research Letters*, 34(20), 1-5. doi:10.1029/2007GL031382
- Lin, H., & Zhou, X. (2008). Evidence of subsurface preferential flow using soil hydrologic monitoring in the Shale Hills catchment. *European Journal of Soil Science*, 59(1), 34-49. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.00988.x>
- Liu, X., He, Y., Zhang, T., Zhao, X., Li, Y., Zhang, L., ... Yue, X. (2015). The response of infiltration depth, evaporation, and soil water replenishment to rainfall in mobile dunes in the Horqin Sandy Land, Northern China. *Environmental Earth Sciences*, 73(12), 8699-8708. <http://doi.org/10.1007/s12665-015-4125-0>
- Lozano-Parra, J., Schnabel, S., & Ceballos-Barbancho, A. (2015). The role of vegetation covers on soil wetting processes at rainfall event scale in scattered tree woodland of Mediterranean climate. *Journal of Hydrology*, 529(Part 3), 951-961. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.018>
- Mosquera, G. M., Célleri, R., Lazo, P. X., Vaché, K. B., Perakis, S. S., & Crespo, P. (2016). Combined use of isotopic and hydrometric data to conceptualize ecohydrological processes in a high-elevation tropical ecosystem. *Hydrological Processes*, 30(17), 2930-2947. <http://doi.org/10.1002/hyp.10927>
- Mosquera, G. M., Lazo, P. X., Célleri, R., Wilcox, B. P., & Crespo, P. (2015). Runoff from tropical alpine grasslands increases with areal extent of wetlands. *Catena*, 125, 120-128. <http://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.010>
- Muñoz, P., Célleri, R., & Feyen, J. (2016). Effect of the resolution of tipping-bucket rain gauge and calculation method on rainfall intensities in an Andean mountain gradient. *Water*, 8(11), 534. <http://doi.org/10.3390/w8110534>
- Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., ... Arias, S. (2016). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes*, 30(22), 4074-4089. <http://doi.org/10.1002/hyp.10980>
- Oosterbaan, R. J., & Nijland, H. J. (1994). *Determining the saturated hydraulic conductivity*. Chapter 12, In: Ritzema, H. P. (Ed.). *Drainage Principles and Applications*, International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), Wageningen, The Netherlands, pp. 1125.
- Padrón, R., Wilcox, B., Crespo, P., & Celleri, R. (2015). Rainfall in the Andean Páramo New Insights from High-Resolution Monitoring in Southern Ecuador. *Journal of Hydrometeorology*, 16(3), 985-996. <http://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0135.1>
- Rodriguez-Iturbe, I. (2000). Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. *Water Resources Research*, 36(1), 3-9.
- Sarkar, R., Dutta, S., & Dubey, A. K. (2015). An insight into the runoff generation processes in wet sub-tropics: Field evidences from a vegetated hillslope plot. *Catena*, 128, 31-43. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.01.006>
- Tetzlaff, D., Soulsby, C., Waldron, S., Malcolm, I. A., Bacon, P. J., Dunn, S. M., ... Youngson, A. F. (2007). Conceptualization of runoff processes using a geographical information system and tracers in a nested mesoscale catchment. *Hydrological Processes*, 21(10), 1289-1307. <http://doi.org/10.1002/hyp.6309>
- Tromp-van Meerveld, H. J., & McDonnell, J. J. (2006). Threshold relations in subsurface stormflow: 1. A 147-storm analysis of the Panola hillslope. *Water Resources Research*, 42(2), n/a--n/a. <http://doi.org/10.1029/2004WR003778>
- van Reeuwijk, L. P. (1993). *Procedures for soil analysis*. International Soil Reference and Information Centre. Retrieved from <https://books.google.com.ec/books?id=r6QdAQAAAJ>
- Weiler, M., & Naef, F. (2003). An experimental tracer study of the role of macropores in infiltration in grassland soils. *Hydrological Processes*, 17(2), 477-

493. <http://doi.org/10.1002/hyp.1136>
- Wiekenkamp, I., Huisman, J. A., Bogen, H. R., Lin, H. S., & Vereecken, H. (2016). Spatial and temporal occurrence of preferential flow in a forested headwater catchment. *Journal of Hydrology*, 534(C), 139-149. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.050>
- Zhu, Q., Nie, X., Zhou, X., Liao, K., & Li, H. (2014). Soil moisture response to rainfall at different topographic positions along a mixed land-use hillslope. *Catena*, 119, 61-70. <http://doi.org/10.1016/j.catena.2014.03.010>

ANEXO. Coeficientes de correlación de Spearman (ρ) entre las condiciones meteorológicas antecedentes y $\Delta\theta_{\max}$ en cada ubicación topográfica y profundidad dentro de la ladera experimental, durante los estados de humedad seco (ES), intermedio (EI) y húmedo (EH). En esta tabla: d = $\Delta\theta_{\max}$; A, M y B, las posiciones altas, media y baja dentro de la ladera; 5, 20, 45 y 75, las profundidades del suelo (cm) en las que se realizó el análisis.

	Ap12h	Ap1d	Ap10d	Ap15d	AETo12d	AETo1d	AETo5d	AETo10d
ES								
dU5	-0.20	-0.03	0.03	0.18	0.35	0.35	0.00	0.16
dU20	-0.16	-0.07	0.24	0.13	0.27	0.27	0.18	0.27
dU45	-0.03	0.15	0.05	0.07	0.35	0.35	0.26	0.36
dU75	0.06	0.16	0.15	0.11	0.36	0.36	0.27	0.32
dM5	0.19	0.23	0.25	0.00	0.00	0.00	0.15	0.14
dM20	0.09	0.19	0.06	-0.14	0.20	0.20	0.26	0.24
dM45	0.05	0.13	0.13	0.04	0.24	0.24	0.31	0.36
dM75	0.02	0.13	0.12	0.03	0.28	0.28	0.29	0.34
dB5	0.07	0.19	0.31	0.07	-0.02	-0.02	0.05	0.00
dB20	0.04	0.11	0.01	-0.07	0.12	0.12	0.16	0.21
dB45	-0.02	0.11	0.16	0.08	0.39	0.39	0.15	0.18
dB75	-0.19	0.01	-0.01	-0.08	0.38	0.38	0.28	0.34
EI								
dA5	0.04	0.10	0.18	0.05	0.07	0.07	-0.08	0.06
dA20	-0.14	-0.11	0.05	-0.02	0.14	0.14	0.04	0.10
dA45	-0.05	-0.03	0.07	-0.06	0.04	0.04	-0.09	0.05
dA75	0.08	0.04	0.13	0.06	0.04	0.04	-0.12	0.01
dM5	-0.02	-0.06	0.10	0.00	0.04	0.04	-0.03	0.04
dM20	-0.15	-0.17	0.03	0.01	0.12	0.12	0.16	0.26
dM45	0.13	0.09	0.09	0.03	0.12	0.12	-0.03	0.11
dM75	0.20	0.17	0.12	0.03	-0.04	-0.04	0.11	0.21
dB5	-0.09	-0.12	0.17	0.11	0.31	0.31	-0.04	-0.05
dB20	-0.19	-0.04	-0.07	-0.12	0.30	0.30	0.10	0.31
dB45	0.09	0.16	0.13	0.03	0.13	0.13	-0.09	0.00
dB75	-0.07	-0.09	0.19	0.10	0.22	0.22	-0.02	0.11
EH								
dA5	-0.03	0.41	-0.03	-0.10	0.01	0.01	-0.07	0.12
dA20	-0.38	0.14	-0.23	-0.35	0.16	0.16	0.45	0.46
dA45	-0.23	0.30	-0.10	-0.24	0.04	0.04	0.16	0.23
dA75	-0.24	0.25	0.06	-0.08	0.02	0.02	0.06	0.12
dM5	-0.32	0.00	-0.45	-0.47	-0.03	-0.03	0.39	0.28
dM20	-0.07	0.36	-0.23	-0.33	0.04	0.04	0.31	0.39
dM45	0.02	0.41	-0.06	-0.16	-0.01	-0.01	0.12	0.28
dM75	0.24	0.46	-0.30	-0.25	0.22	0.22	0.10	0.18
dB5	-0.40	0.16	0.46	0.33	0.29	0.29	0.34	0.40
dB20	-0.09	0.34	-0.09	-0.29	0.18	0.18	0.09	0.26
dB45	-0.12	0.17	-0.28	-0.41	0.01	0.01	0.00	0.05
dB75	-0.18	0.20	-0.34	-0.29	0.14	0.14	0.22	0.29



Unidimensional, non-stationary modeling of a high mountain river in southern Ecuador



Ana Ochoa-Sánchez^{1,2,3} , Luis Timbe^{1,2} , Angel Vázquez-Patiño^{1,2,3,4} ,
Esteban Samaniego^{1,2,3}

¹ Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.

² Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.

³ Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.

⁴ Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.

Autora de correspondencia: ochoa.anaelizabeth@gmail.com

Fecha de recepción: 19 de septiembre de 2018 - Fecha de aceptación: 26 de noviembre de 2018

RESUMEN

Las inundaciones son una causa severa de muertes y pérdidas económicas. Para prevenir, mitigar y reducir los riesgos por inundaciones y sus consecuencias, los modelos hidráulicos permiten el análisis y mapeo de dichas inundaciones. Los resultados de un modelo apropiado, que trabaje en base a condiciones locales, son herramientas valiosas para los gobiernos locales, conduciendo a un manejo sustentable de las llanuras de inundación. Alrededor del mundo, muy pocos ríos de alta montaña han sido modelados; y, debido a su orografía, la escasez de datos presenta una dificultad adicional en su investigación. Tomando en cuenta que todos los modelos unidimensionales asumen que el fondo del río tiene una pendiente pequeña, este estudio evalúa dos modelos unidimensionales ampliamente usados: Mike11 y HEC-RAS, para modelar un río de alta montaña. La mejor configuración del modelo, bajo condiciones topográficamente complejas, y su potencial uso fueron valorados mediante su calibración y validación. Al contrario de los resultados obtenidos para el modelo Mike11, tanto en calibración como en validación, hemos encontrado que el modelo HEC-RAS no es capaz de encontrar una solución estable durante el modelamiento hidrodinámico del río. Este estudio sienta un precedente en cuanto a modelación unidimensional en ríos de alta montaña con escasez de datos.

Palabras clave: modelación de ríos 1D, HEC-RAS, Mike11, ríos de alta montaña, Ecuador.

ABSTRACT

Floods represent a severe cause of deaths and economic loss. In order to prevent, mitigate, and reduce flood risks and their consequences, hydraulic models allow analysing and mapping floods. The results of an appropriate model that works under local conditions are a valuable tool for local governments leading to sustainable management of floodplains. Around the world, high-mountain rivers have been poorly modelled; their orography and data scarcity present an extra research difficulty. Considering that all one-dimensional models assume that the river bed slope is small, this study evaluated two widely applied one-dimensional models: Mike11 and HEC-RAS, for modelling a high mountain river. Their best configuration under complex topographical conditions and their potential use was assessed by calibration and validation of the models. We found that the HEC-RAS model was not able to define a stable solution of the hydrodynamic modelling of the river, while Mike11 yielded stable results. Furthermore, the validation of the Mike11 model showed good performance. This study sets a precedent in the 1D modelling of high-mountain rivers with data scarcity.

Keywords: 1D river modelling, HEC-RAS, Mike11, high-mountain river, Ecuador.

1. INTRODUCTION

Floods represent about 40% of the natural disasters in the world (Ohl & Tapsell, 2000) and they killed most people by 2016 (Guha-Sapir, Hoyois, & Below, 2011). In addition, extraordinary river floods considerably increased the past years involving economic loss (Cunha & Krajewski, 2011; Dottori et al., 2018; Gilles, Young, & Schroeder, 2012). Hydraulic models allow analysing and mapping floods that help to prevent, mitigate, and reduce flood risks and their consequences. Different methodologies are useful for flow modelling and the analysis of river flood events, from linear interpolation of water level records (0D) (Apel, Aronica, Kreibich, &

Thieken, 2009) to complete hydrodynamic one-dimensional (1D), two-dimensional (2D), coupled 1D and 2D models (Finaud-Guyot, Delenne, Guinot, & Llovel, 2011), or even three-dimensional (3D) models (Pender & Néelz, 2007). Model selection depends on the information required, flow characteristics, and type and scale of the specific application. So far, 1D models are most widely used since they require less information (cross sections and roughness coefficients) to be robust and to provide good quality results when the flow is aligned with the main channel axis of the river (Pender & Néelz, 2007; Vojinovic & Seyoum, 2011). Although 2D models are more popular lately due to the increase of the computational capacity and information availability, they have difficulties when



hydraulic structures need to be included, and their computational demand and requirement of information is still high.

The one-dimensional hydrodynamic models, HEC-RAS and Mike11, are the most widely used for flood events analysis and flood mapping (Alaghmand, Abdullah, Abustan, & Eslamian, 2012; Andrei, Robert, & Erika, 2017). The Federal Emergency Management Agency of the US (FEMA) accepts both for this kind of application (FEMA, 2018). These models compute one-dimensional solutions of the Saint-Venant equation. HEC-RAS model is freeware while Mike11 has a commercial license.

All one-dimensional models assume that the river slope is small, which is not the case for high mountain rivers. Therefore, this study identifies the possibility of using one-dimensional models for flood modelling of a high mountain river, their best configuration under these topographical conditions, and their potential use. The results of an appropriate model that works under such conditions are a valuable tool for governments leading to sustainable management of floodplains. This study compares the performance of HEC-RAS and Mike11 models and calibrates and evaluates both these models at a high mountain river.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Study area and data availability

The river branch of the Quinoas River is located at *El Cajas* National Park in the Andean region of Ecuador, geographically defined by 2.7° - 2.8°S and 79.0° - 79.3°W

(Fig. 1). The microcatchment area of the river branch studied is approximately 86.5 km² and its altitudinal range is between 3,000 and 4,400 m a.s.l. (Fig. 1). The complete Quinoas microcatchment (94 km²) belongs to the subcatchment of the Río Tomebamba (380 km²) and the Paute catchment (6148 km²). The river branch length is 11.4 km and its slope changes abruptly along the river length with a maximum of 18%, a minimum of 1.5%, and a media of 6%. The main channel bottom consists of gravels, cobbles, and a few boulders, while there are short-grass pasture floodplains.

Three hydrological stations are situated in strategical locations along the river branch (Fig. 1). Data from *Virgen del Cajas* (VC) station located upstream and *Puente Matadero* (PM) station at the downstream of the river constituted the model boundary conditions. Data from *Chirimachay* (CH) station was used to calibrate and validate the hydraulic model. The water level time series with a 5-minute temporal resolution were checked for homogeneity and outliers. The salt dilution gauging technique applied in the field allowed building rating curves for the three stations. Four events from around a month were selected from one year of data (Table 1). The hydrographs for the boundary conditions during calibration and validation are shown in Figure 2. The microcatchment was divided in seven contribution areas (Fig. 1) that allowed the model to distribute the discharge difference between PM and VC stations along the river.

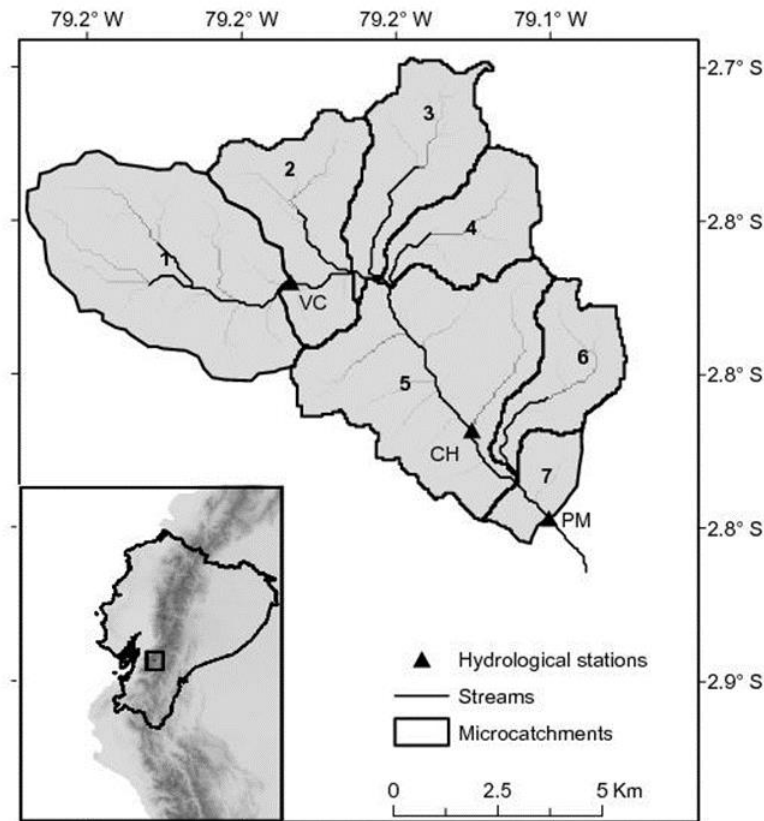
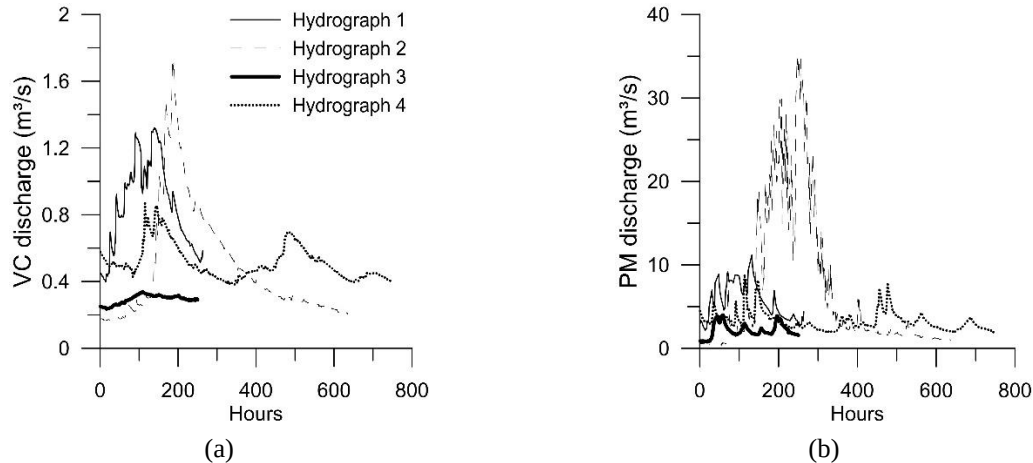


Figure 1. Location of the study area and hydrological stations. Subdivision of the microcatchment into areas of contribution to the river branch.

Table 1. Events for calibration and validation of the Mike 11 model.

	Event duration		Maximum discharge registered [m ³ /s]		
	Initial date	Final date	VC	CH	PM
Hydrograph 1	07/05/2014 00:00	17/05/2014 23:00	1.3	7.3	11.2
Hydrograph 2	05/10/2014 00:00	31/10/2014 11:00	1.7	7.5	35.0
Hydrograph 3	13/07/2014 00:00	23/07/2014 09:00	0.3	3.4	4.0
Hydrograph 4	18/05/2014 00:00	18/06/2014 00:00	0.9	5.2	8.9

**Figure 2.** Events for calibration and evaluation of the model at (a) Virgen del Cajas (VC) station and (b) Puente Matadero (PM) station.

Hydraulic models

In this study, the models HEC-RAS (Version 4.1) and Mike11 (Version 2007) were configured to perform the one-dimensional unsteady flow in the Quinuas high mountain river reach. The model's configuration, calibration, and evaluation analysis aimed to represent the river hydraulics under the condition of steep slopes. Since models normally assume that the slope is small and supercritical flow was expected, the modifications introduced in both these models for the modelling of a mixed flow regime (MFR: subcritical and supercritical flow) are specified in the following.

Mike11 model

The hydrodynamic module (HD) in Mike11 uses an implicit differential scheme developed by Abbott & Ionescu (1967) for non-permanent flow calculation in rivers and estuaries. This module can describe subcritical and supercritical flow through a numerical scheme that follows the local flow conditions in time and space. The computational scheme is suitable for vertical homogeneous flow from steep rivers to tidal influenced estuaries (DHI, 2017). Stability conditions depend particularly on the relationship between the time step and grid spacing. Mike11 allows selecting between three flow descriptions: dynamic wave, kinematic wave, and diffusive wave. The first one can be chosen between high order fully dynamic wave and dynamic wave only. It describes flow considering all the terms of the Saint-Venant equation (local acceleration, convective acceleration, pressure force, gravity force, and friction force). The kinematic wave assumes a balance between the friction and gravity terms and, consequently, does not account backwater effects. The diffusive wave ignores inertial terms (DHI, 2017). Mike11 dynamic wave approach assumes that the water is incompressible and

homogeneous, the bottom-slope is small, the wavelengths are large compared to the water depth, and the flow is subcritical (DHI, 2007). For supercritical flow, a reduced momentum equation is applied which neglects the convective acceleration term of the Saint Venant equation. For the transition of sub-critical to supercritical flow, a gradual reduction of the momentum term is introduced for smooth description. Also, the differential equation is upstream gradually centred as the influence of the upstream condition increases. Details on the suppression of convective acceleration are in section 1.35.1 of the Mike 11 Reference Manual (DHI, 2007).

HEC-RAS model

The non-stationary flow component of the HEC-RAS model is able of calculating one-dimensional flow of natural and artificial channels. The model solves continuity and momentum equations with a solution scheme, primarily developed for subcritical flow, that was adapted from the UNET model by Barkau (1996), and it is known as the four-point scheme, box scheme, or Preissman scheme. Drastic changes in the cross sections' properties, wave characteristics, and complex hydraulic structures affect the stability of the scheme (Brunner, 2010). Since the release of Version 3.1, the model can perform MFR (subcritical, supercritical, hydraulic jumps, and drawdowns). The so-called Local Partial Inertia (LPI) solution technique approach is used to carry out the MFR analysis (Fread, 1996). As stated by Brunner (2010), when this option is turned on, the program monitors the Froude number at all cross-sections each time step. As the Froude number gets close to 1.0, the program automatically reduces the magnitude of the inertial terms in the momentum equation since this increases the model's stability. Otherwise, for Froude numbers equal to or greater than 1.0, the inertial terms are completely zeroed

out and the model is essentially reduced to a diffusion wave routing procedure (Brunner, 2010).

Models configuration

During field survey, cross sections were measured every 25 m and nearer at the presence of meanders. Geometry was processed in CivilCad® and imported afterwards in HEC-RAS and Mike11. Open boundary conditions corresponded to a hydrograph at VC (upstream) and water level time series at PM (downstream). Also, hydrographs as point source inflows were configured in the cases of the microcatchments number 2, 3, 4, and 6 (Fig. 1); and as distributed source inflows at the microcatchments number 5 and 7 (Fig. 1). Initial conditions corresponded to the first discharge in each hydrograph at VC. Simulations time intervals were 0.5 seconds to guarantee model stability. Model's output temporal resolution was one hour.

2.2. Model calibration

Three events were used for model calibration: Hydrographs 1, 2, and 3 (Fig. 2 and Table 1). Fifty simulations were run for every hydrograph. The friction coefficient was one of the most important parameters when calibrating the one-dimensional models, given the absence along the river reach of hydraulic structures (i.e., weirs). Manning's coefficient (n) represents friction and can be approximated by three methods: field surveys, estimations in the literature, and value adjustments (Vidal, Moisan, Faure, & Dartus, 2007). Moreover, n should be calibrated based on observed and simulated water levels. In this study, we considered field survey results, however, those values were far from the more realistic values available in literature.

Table 2. Manning's coefficient ranges for the Quinuas River.

	Reach stations [m]	n
Main channel	11,400-0	0.025-0.050
Floodplains	0-2,948.31 and 7,847.88-9,693.67	0.040-0.080
	2962.06-7828.08 and 9,742.18-11,400	0.110-0.600

During calibration, cross section files were created by changing Manning values randomly (uniform distribution) from a theoretical range according to the channel and floodplains material of the river (Table 2). At Chirimachay station (CH in Fig. 1), water levels from the simulations were compared to the observations through the mean error (ME), the mean square error (MSE), the bias percentage (pbias), the Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient (NSE), the Kling-Gupta efficiency (KGE), and the volumetric efficiency (VE). The first coefficient was used to measure the average systematic difference between the modelled and observed water levels. The MSE was used since it is built up on two terms: the first corresponds to ME and the second measures the variance of the random error after bias correction. The NSE is dimensionless and a scaled version of the MSE. NSE does not depend highly on the water level magnitude, an advantage over ME or MSE. The last two coefficients were developed by Gupta, Kling, Yilmaz, & Martinez (2009) and Criss & Winston (2008), respectively, to cope with some problems of the

NSE like its overemphasis on large flows relative to other measurements. KGE ranges from -Inf to 1 and VE ranges from 0 to 1; the closer to one, the more accurate the model is for both coefficients. All the metrics were calculated with the hydroGOF R package. Details on the formulation of each index can be consulted at Zambrano-Bigiarini, (2017). The simulation with the lowest ME, MSE, and pbias and the highest NSE, KGE, and VE was defined as the best result possible during calibration and thus their Manning's coefficients were chosen to evaluate the model afterwards. Since model results change in function of the change in input parameters, it is useful to understand model's dependence on the information from which the model is built. This analysis increases the confidence level of the model and its predictions by comprehending the behaviour of the model, its parameters, and applicability. The Manning's coefficients used during calibration lead to fifty simulations per event that were represented as a range of hydrographs that were plot against observations in CH to show the change in the model's results when bed and floodplain resistance were changed.

2.3. Model performance evaluation

Hydrograph 4 (Fig. 2) was compared with model simulation results at CH, using the same statistic coefficients explained before. At this stage, evaluation need to be completed by a graphical method (Willems, 2011). WETSPRO tool (Willems, 2009) was used to analyse events characteristics in a time series, such as high flows, cumulative values representation, and prediction capacity of the model.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Mike11 vs. HEC-RAS modelling

Mike11 and HEC-RAS modelling of the 11.4 km of the Quinuas river was conducted for historical events. Figure 3 shows the models results at the most downstream station (PM) in comparison with the water level time series observations (11/10/2013 00:00 - 14/11/2013 00:00). Mike11 yielded a hydrograph coherent with the water level variations observed in the field (Fig. 3a) while HEC-RAS instability issues were notorious (Fig. 3b). Usually, increasing the number of cross sections in steep slopes and decreasing the time step, corrects instability but it was not the case for this HEC-RAS simulation where almost all flow values were negative and high flow variations were present (Fig. 3b). The current simulation was run with and without MFR, and mixed flow options (exponent for Froude number reduction factor m and Froude number threshold for eliminating acceleration terms) were modified. However, instability showed in Figure 3b remained. Figure 4 shows the Froude numbers obtained with the HEC-RAS simulation. Results clearly reveal that along all the 11.4 km of the river, Froude numbers were completely out of range. In steep slopes, Froude numbers are expected to be higher than 1 but Figure 4 shows values up to 1,100 even when outliers were not plot. When HEC-RAS finds Froude numbers higher than 1, the inertial terms of the Saint-Venant equation are completely zeroed out and the model is reduced to a diffusion wave routing procedure (Brunner, 2010). This did not allow the model to find stable results.

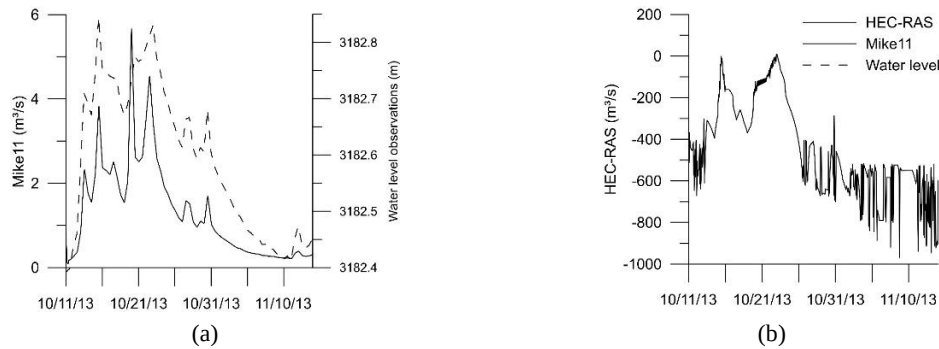


Figure 3. Modelled and observed hydrographs at the downstream PM station of the river.

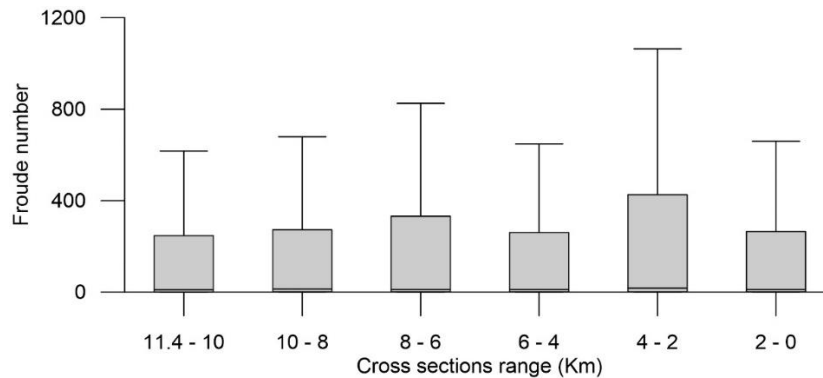


Figure 4. Froude numbers boxplots at cross sections ranges. Boxplots interquartile ranges correspond to 1.5 and outliers are not shown.

Table 3. Mean error (ME), mean squared error (MSE), bias percentage (pbias), Nash-Sutcliffe coefficient of efficiency (NSE), Kling-Gupta coefficient (KGE), and volumetric efficiency (VE) of calibration and validation events.

		ME [m]	MSE [m ²]	pbias [%]	NSE	KGE	VE
Calibration events	1						
	Most efficient sim.	-0.01	0.00	-0.6	0.82	0.91	0.98
	Least efficient sim.	0.29	0.09	24.8	-18.62	-0.05	0.75
	2						
	Most efficient sim.	0.04	0.03	3.6	-1.64	-0.35	0.90
	Least efficient sim.	0.32	0.23	30.5	-22.99	-2.48	0.68
Validation event	3						
	Most efficient sim.	-0.01	0.00	-0.9	0.72	0.56	0.98
	Least efficient sim.	-0.35	0.12	-34.5	-77.97	0.39	0.65
Validation event	4						
	Evaluation sim.	0.0004	0.0003	0.00	0.81	0.73	0.99

Mike11 results at Chirimachay station were stable, including the rating curve and discharge time series (not shown). MIKE11 gives the user the opportunity to choose between three flow descriptions: dynamic wave, kinematic wave, and diffusive wave (DHI, 2007). For the dynamic wave approach, it gives two choices: dynamic wave and high order dynamic wave. The first attempt to model the Quinuas river was done using the kinematic wave approach since this flow description is recommended for steep slopes (DHI, 2007). The assumption of a balance between friction and gravity means that the kinematic wave approach cannot simulate backwater effects; and thus, this description is appropriate for relatively steep rivers without backwater effects (DHI, 2007). However, the model configured with the kinematic wave method was unstable. The remaining flow descriptions were used as well; however, stable conditions were only reached with

the high order dynamic wave approach using a time step of 0.5 seconds.

Bennett, Walton, Dickerson, & Howard (2004) states that the computational method for determining channel roughness is one such difference between HEC-RAS and Mike11 and they provide a conversion between the two coefficients in order to find similar results with the models. However, in this study, the roughness coefficient was not the cause of the dissimilarity since HEC-RAS was run with multiple coefficients and the instability remained. Stability was only achieved when the high order dynamic wave option in Mike 11 was run. During supercritical flow, Mike11 used the Saint-Venant equation without the convective term while HEC-RAS eliminated the local and the convective acceleration terms. Additionally, Mike11 modifies the scheme during supercritical conditions. These differences resulted in a stable Mike11 simulation.

Therefore, Mike 11 software was chosen for the river branch unsteady flow calibration and validation stages.

3.2. Mike11 model calibration

Fifty simulations with different Manning's coefficients were run in Mike11 for each of the three hydrographs used for calibration. Water levels were compared, and one simulation has the minimum ME, MSE, and pbias and the maximum KGE, VE and NSE; while other simulation has the maximum ME, MSE, and pbias and the minimum KGE, VE and NSE (Table 3). Figure 5 shows changes in the model's results due to the changes in the Manning's coefficient. The n values from the most efficient model were chosen during this stage as having better statistical results (Table 4).

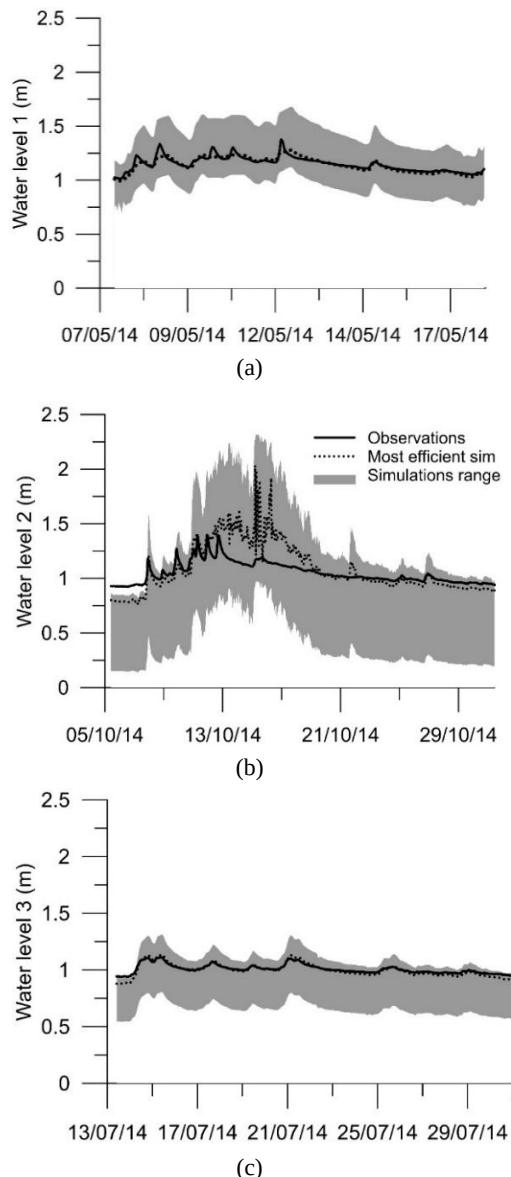


Figure 5. Modelled and observed water levels at CH station during calibration stage: (a) Observed Water level 1 corresponds to Hydrograph 1 in Figure 2; (b) Observed Water level 2 corresponds to Hydrograph 2 in Figure 2; (c) Observed Water level 3 corresponds to Hydrograph 3 in Figure 2.

The ME, MSE and pbias of the best simulation showed a low biased model, especially for low and medium flows (water level 1 and water level 3, Table 3). Also, for those water level magnitudes, the NSE, KGE and VE indexes were more than 0.6 and even 0.99, showing a good agreement between model and observations. However, the second event coefficients showed a model that overestimated water levels in 30% and had a poor performance, with negative values of NSE and KGE (Table 3 and Fig. 5b). These results are understandable given that the high peaks in the second event gauged at PM (Fig. 2) were very difficult to measure due to the high turbulence involved.

Table 4. Manning's coefficients (n) values chosen during calibration of the Mike 11 model.

	Reach stations (m)	n
Main channel	11,400-0	0.032
Floodplains	0-2,948.31 and 7,847.88-9,693.67	0.040
	2,962.06-7,828.08 and 9,742.18-11,400	0.593

3.3. Mike11 model performance evaluation

Statistical results of the model performance evaluation are shown in Table 4. The errors showed good performance of the model in all the calculated coefficients. The unbiased model has an NSE of 0.81 (Table 3). The KGE value during validation, showed that the model estimates agreed in 73% with the observed values when the three aspects of validation: correlation, bias, and variability were decomposed (Gupta et al., 2009). A value of VE equal to the one, in Table 3, means that 99% of water was delivered in a proper time (Criss & Winston, 2008). Low and high flows were treated equally when evaluating the model with VE. Until now, evaluation corresponded to an average of high and low flows altogether. Therefore, a complementary graphical analysis for validation follows.

Mike11 flows were plotted against observations (see Fig. 6) showing underestimation of the low and high flows but a notorious correlation. Baseflow was estimated with the WETSPRO tool and shown in Figure 6.

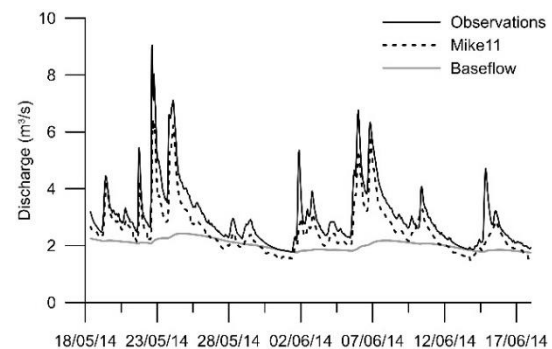


Figure 6. Modelled, observed and baseflow time series at CH station during evaluation stage.

This approach allowed finding peaks over a threshold (also called events) that are useful when peaks occur in a different time step on the observed and modelled time series. Afterwards, transformation of the events was needed to reach independency of the residuals on the flow values (homoscedastic residuals). Figure 7 shows the

transformed simulated against observed events together with the mean deviation, bisector, and standard deviation.

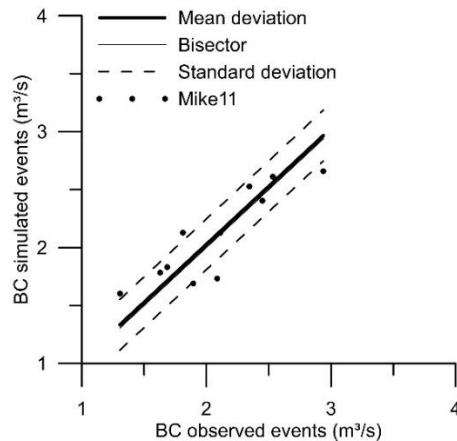


Figure 7. Observed and modelled peak flows at CH station during evaluation stage.

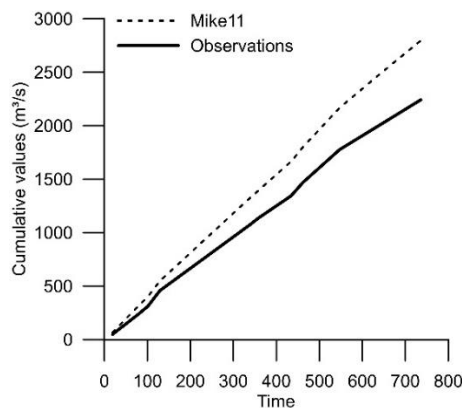


Figure 8. Observed and modelled cumulative values at CH station during evaluation stage.

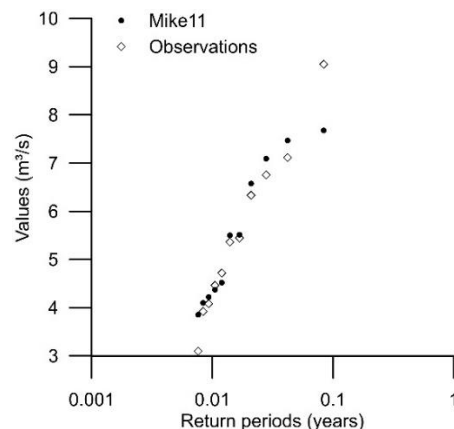


Figure 9. Observed and modelled events vs return period at CH station during evaluation stage.

Displacement of the bisector from the mean and scattering of the points usually shows when a model is biased. In this case, such displacement does not exist since we have an unbiased model. In addition, the river is displayed as a reservoir in Figure 8, where Mike 11 underestimated cumulative values. In conclusion, Figure 9 depicts the

predictable capacity of the model by plotting the events against their return period. Most of the selected events were well estimated by the model, and only a peak of around $9 \text{ m}^3/\text{s}$ was underestimated. The latter is not a final-conclusion due to data scarcity, but it is under consideration since monitoring is ongoing.

4. CONCLUSIONS

We modelled a river branch of the high mountain Quinuas river with the Mike11 and the HEC-RAS models. Model implementation of both models showed similar complexity, so does their operation. However, in this study, the Mike11 model provided stable results, while the HEC-RAS model's instability remained after several configurations were attempted. Reasons for this discrepancy were found in the treatment that the models give to supercritical flows. When the Froude number is equal or exceeds 1, Mike 11 calculates the Saint-Venant equation excluding the convective acceleration term, while HEC-RAS eliminates the local and the convective acceleration terms. Additionally, Mike11 modifies the scheme during supercritical conditions for a smooth transition from subcritical to supercritical flow. Therefore, only Mike11 could be used for calibration and evaluation of the Quinuas river branch.

During calibration of the Mike11 model, a range of Manning's coefficient (n) values was determined representing theoretically bed resistance in the channel and floodplains. We simulated fifty randomly chosen values for each event of the three selected hydrographs. Results revealed that the model was sensitive to the bed resistance of the channel and floodplains. Calibration allowed choosing the optimum values of n .

During model performance evaluation, we determined that the model was able to estimate water levels with almost no bias ($ME = 0.0004 \text{ m}$, $MSE = 0.0003 \text{ m}^2$) and an NSE of 0.81. Evaluation concludes that the unbiased model has a high predictive capability, especially at low and medium flows. This model could be useful in the future to implement flood warning systems in the Andean region, a region characterized for having steep slope rivers.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was funded by the DIUC (Research Directorate of the University of Cuenca) via the project "Desempeño y fiabilidad de modelos hidráulicos unidimensionales para la modelación de inundaciones en ríos de montaña".

REFERENCES

- Abbott, M., & Ionescu, F. (1967). On the numerical computation of nearly horizontal flows. *Journal of Hydraulic Research*, 5(2), 97-117.
- Alaghmand, S., Abdullah, R., Abustan, I., & Eslamian, S. (2012). Comparison between capabilities of HEC-RAS and MIKE11 hydraulic models in river flood risk modelling (a case study of Sungai Kayu Ara River basin, Malaysia). *International Journal of Hydrology*

- Science and Technology*, 2(3), 270-291.
<http://doi.org/10.1504/IJHST.2012.049187>
- Andrei, A., Robert, B., & Erika, B. (2017). *Numerical limitations of 1D hydraulic models using MIKE11 or HEC-RAS software - Case study of Baraolt River, Romania*. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/245/7/072010>
- Apel, H., Aronica, G., Kreibich, H., & Thieken, A. (2009). Flood risk analyses - how detailed do we need to be? *Natural Hazards*, 49(1), 79-98.
- Barkau, R. (1996). *UNET: One-dimensional unsteady flow through a full network of open channels. User's manual*. California. Retrieved from <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA315684>
- Bennett, T. H., Walton, R., Dickerson, P. D., & Howard, J. W. (2004). *Comparison of HEC-RAS and MIKE11 unsteady flow modeling for the Tillamook Valley*. In: Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management (pp. 1-8). ASCE. Retrieved from <http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?142251>
- Brunner, G. (2010). *HEC-RAS, River analysis system. Hydraulic reference manual. Version 4.1*. Davis, CA: U.S. Army Corps of Engineers. Retrieved from http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/hecras_4.1_reference_manual.pdf
- Criss, R. E., & Winston, W. E. (2008). Do Nash values have value? Discussion and alternate proposals. *Hydrological Processes*, 22(14), 2723-2725.
<http://doi.org/10.1002/hyp.7072>
- Cunha, L., & Krajewski, W. (2011). A framework for flood risk assessment under nonstationary conditions or in the absence of historical data. *Journal of Flood Risk Management*, 4(1), 3-22.
- DHI. (2007). *Mike 11. A modelling system for rivers and channels. Reference manual*. Horsholm, Denmark: Danish Hydraulic Institute
- DHI. (2017). *MIKE 2017 Service Pack 2*. Horsholm, Denmark: Danish Hydraulic Institute. Available at <https://www.mikepoweredbydhi.com/download/mike-2017>
- Dottori, F., Szewczyk, W., Ciscar, J.-C., Zhao, F., Alfieri, L., Hirabayashi, Y., ... Feyen, L. (2018). Increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming. *Nature Climate Change*, 8(9), 781-786. <http://doi.org/10.1038/s41558-018-0257-z>
- FEMA. (2018). *Hydraulic numerical models meeting the minimum requirement of national flood insurance program*. Retrieved from <https://www.fema.gov/hydraulic-numerical-models-meeting-minimum-requirement-national-flood-insurance-program>
- Finaud-Guyot, P., Delenne, C., Guinot, V., & Llovel, C. (2011). 1D-2D coupling for river flow modeling. *Comptes Rendus - Mécanique*, 339(4), 226-234.
<http://doi.org/10.1016/j.crme.2011.02.001>
- Gilles, D., Young, N., & Schroeder, H. (2012). Inundation mapping initiatives of the Iowa Flood Center: Statewide coverage and detailed urban flooding analysis. *Water*, 4(1), 85-106.
- Guha-Sapir, D., Hoyois, P., & Below, R. (2011). *Annual disaster statistical review 2010: The numbers and trends*. Brussels, Belgium: Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), Université Catholique de Louvain. Available at cred.be/sites/default/files/ADSR_2010.pdf
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377, 80-91.
- Ohl, C. A., & Tapsell, S. (2000). Flooding and human health. *BMJ (Clinical Research Ed.)*, 321(7270), 1167-8. <https://doi.org/10.1136/bmj.321.7270.1167>
- Pender, G., & Néelz, S. (2007). Use of computer models of flood inundation to facilitate communication in flood risk management. *Environmental Hazards*, 7(2), 106-114.
- Vidal, J.-P., Moisan, S., Faure, J.-B., & Dartus, D. (2007). River model calibration, from guidelines to operational support tools. *Environmental Modelling & Software*, 22(11), 1628-1640.
<http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.12.003>
- Vojinovic, Z., & Seyoum, S. (2011). Effects of model schematisation, geometry and parameter values on urban flood modelling. *Water Science & Technology*, 63(3), 462-467.
- Willems, P. (2009). A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models. *Environmental Modelling & Software*, 24(3), 311-321. <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.09.005>
- Willems, P. (2011). *Modelling guidelines for water engineering. Chapter 4. Model calibration and validation*. Leuven, Belgium: Katholieke Universiteit Leuven, Faculty of Engineering.
- Zambrano-Bigiarini, M. (2017). *hydroGOF R package*. Available at: <http://hzambran.github.io/hydroGOF/>



Aplicación de ecuaciones de estado cúbicas y desarrollo de correlaciones numéricas para el cálculo de propiedades termodinámicas en saturación de refrigerantes para su uso en microcontroladores



García del Valle J. 

Área de Energía, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.

Autor para correspondencia: jav.garcia@uta.edu.ec

Fecha de recepción: 4 de octubre 2017 - Fecha de aceptación: 21 de octubre 2018

RESUMEN

Actualmente las librerías para cálculo de propiedades termodinámicas se basan en la ecuación de la energía de Helmholtz, cuya implementación informática sobrepasa los requerimientos de memoria de la mayoría de microcontroladores, estando además escritas en lenguajes de alto nivel. En la presente investigación, después de estudiar el comportamiento de cinco variantes de la ecuación de Peng-Robinson, se propuso el desarrollo de ecuaciones sencillas para las propiedades de saturación que igualasen o mejorasen las predicciones anteriores, al mismo tiempo que fuesen de fácil implementación en lenguaje C, para su uso en microcontroladores. Partiendo de las propiedades obtenidas por la librería de referencia RefProp, se realizarán ajustes multiparamétricos, por mínimos cuadrados, de distintas propiedades termodinámicas, en base a un número de ecuaciones propuestas. Tanto una discusión de la mejor función para cada propiedad, así como los coeficientes e incertidumbres medias y locales han sido reportados para un número de refrigerantes comunes.

Palabras clave: Refrigerante, microcontrolador, saturación, propiedad termodinámica, lenguaje C.

ABSTRACT

The state-of-the-art of computer libraries in the field of thermodynamic properties are based on the Helmholtz energy equation. Unfortunately, the use of high-level programming languages and its complex implementation often exceeds the memory limit of most microcontrollers. In this context, after examination of the behavior of five variants of the Peng-Robinson equation, a set of simple equations for the saturation properties of common refrigerants that exceeded the precision of the former ones were developed. The proposed correlations are directly programmable in C language, facilitating the implementation in microcontrollers. Several prototype equations were fitted to the thermodynamic data in the reference RefProp library for a few thermodynamics properties by means of a non-linear multiparametric least-squares fitting procedure. Finally, a discussion of the best function for each property, as well as the average and local coefficients and uncertainties have been reported for several common refrigerants.

Keywords: Refrigerant, microcontroller, saturation, thermodynamic property, C language.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de microcontroladores para el control térmico en electrodomésticos y pequeña maquinaria industrial, relacionada con aplicaciones frigoríficas, es cada día más común. Desde válvulas de expansión electrónicas para ciclos frigoríficos (CAREL Industries S.p.A., 2017) hasta analizadores y cargadores de gas (YellowJacket, 2017), su funcionamiento pasa por el uso de un microcontrolador. En estos casos, el uso de propiedades termodinámicas es necesario para relacionar la presión con la temperatura para un refrigerante en saturación. Otros parámetros como entalpías y calores específicos pueden ser también de utilidad. Los controladores comerciales implementan código cerrado, el cual no está disponible para su implementación en plataformas abiertas de desarrollo, tipo Arduino y sus derivados. Dado además que existen restricciones en cuanto a memoria en las citadas plataformas, la implementación directa de librerías de referencia para cálculos termodinámicos como RefProp (NIST, 2017) o el proyecto de código abierto CoolProp

(Bell, Wronski, Quoilin & Lemort, 2014), se convierten en alternativas inviables.

El estado del arte en la determinación de propiedades termodinámicas se basa en la proposición y posterior ajuste de ecuaciones multiparamétricas para la energía de Helmholtz en función de la temperatura y densidad del fluido (Span, 2000). A partir de dicha expresión y mediante termodinámica diferencial, el resto de propiedades termodinámicas pueden ser calculadas. A pesar del consenso y uso extensivo de funciones de estado basadas en la energía de Helmholtz (Wolfgang & Kretzschmar, 2008), ecuaciones de estado no analíticas basadas en la ecuación de Benedict-Web-Rubbin o Martin-Hou son todavía empleadas en literatura técnica (DuPont TM Suva®, 2017). Formulaciones más simples, basadas en la ecuación de Peng-Robinson (Poling, Prausnitz & O'Connell, 2001), están en desuso excepto en aplicaciones especializadas (Brown, 2007). Para las ecuaciones de estado anteriores, independientemente de su morfología, aparecen formulaciones implícitas que requieren soluciones numéricas de ecuaciones no lineales. Dichas



soluciones no son sólo exigentes para un microcontrolador, sino que además se hace necesario la programación de algoritmos robustos con manejo de errores y excepciones automáticas. Además, la precisión simple en operaciones de coma flotante encontradas en microcontroladores de 8 bit pueden introducir errores máquina apreciables en soluciones iterativas de ecuaciones.

Una solución simple a este problema es la construcción de una base de datos estructurada e interpolación para la propiedad termodinámica deseada. Tanto interpolaciones lineales como métodos mejorados de interpolación, por ejemplo, splines cúbicas, han sido propuestos en la literatura (Atalay & Coban, 2015) con altos grados de representatividad en relación con las propiedades exactas. Esta aproximación al problema se traduce en rutinas rápidas y robustas de cálculo con la contrapartida de una base de datos que puede ser de tamaño moderado en función de la región y el número de propiedades termodinámicas que se quieran cubrir. Si, además, como es el caso en la presente investigación, se quiere abarcar un número extenso de refrigerantes, se puede incurrir de nuevo en restricciones de memoria flash del microcontrolador. Otro método propuesto en la literatura se basa en la construcción de un sistema de ecuaciones implícitas para una cierta región con una formulación más simple que la ecuación original de Helmholtz (Zhao, Ding & Wu, 2009). Aunque el método produce buenos resultados, se tienen de nuevo los problemas mencionados con anterioridad en relación con los esquemas numéricos para resolver sistemas no lineales. Para microcontroladores sería preferible una formulación explícita del problema. Expresiones polinómicas han sido propuestas con anterioridad (Cleland, 1994; Vikrant & Radermacher, 2014), sin embargo, un número reducido de propiedades o refrigerantes han sido cubiertos en dichos estudios. Ecuaciones más complejas, basadas en funciones exponenciales y/o logarítmicas, también ha sido sugeridas para la presión de saturación (Iglesias-Silva, Miller, Ceballos, Hall & Holste, 1995) o para describir distintas propiedades de un único refrigerante (Affandia, Mamat, Kanafiah & Khalid, 2013).

En el presente estudio, tras analizar el comportamiento de ecuaciones de estado cúbicas tipo Peng-Robinson, se persigue obtener formulaciones explícitas óptimas y con error conocido para 14 refrigerantes comunes y para 9 propiedades termodinámicas en saturación como: presión, densidad, energía interna, entalpía, entropía, calor específico a presión constante y a volumen constante, velocidad del sonido y coeficiente de Joule-Thompson en función de la temperatura de saturación.

2. MÉTODOS

2.1. Estudio de ecuaciones cúbicas tipo Peng-Robinson

En una primera etapa se ha estudiado el empleo de ecuaciones de estado cúbicas para obtener las condiciones de equilibrio líquido-vapor. En particular se ha optado por la ecuación de Peng-Robinson. Si bien para el cálculo de entalpías y entropías es necesario una expresión para la entalpía de gas ideal, el equilibrio líquido-vapor puede ser calculado únicamente mediante la ecuación de estado, si bien dicho procedimiento no es directo. Para cada isoterma, aparece la resolución de un sistema no lineal de tres ecuaciones que involucra la integral de Maxwell, ecuación (1), y la ecuación de estado para líquido y vapor. Como resultado se obtiene la presión, densidad de líquido y densidad de vapor. Para la resolución de dicho sistema se ha realizado un programa en C++ que, de forma genérica, resuelve el equilibrio para cualquier función cúbica de estado (García, 2018). Dado que las curvas son suaves, se ha empleado una integral por la regla del trapecio y el método de la secante ha sido empleado para la resolución del sistema.

$$p(v_v - v_l) = \int_{v_v}^{v_l} p \, dv \quad (1)$$

La ecuación de estado de Peng-Robinson ha sido ampliamente estudiada en la literatura. En Lopez-Echeverry, Reif-Acerman & Araujo-Lopez (2017) se hace una revisión exhaustiva de las diferentes modificaciones propuestas por diferentes autores para mejorar la predicción de la formulación original (Peng & Robinson, 1979). Dos caminos han sido propuestos. El primero, siguiendo la idea original, propone obtener los coeficientes de la ecuación de estado en función de parámetros físicos del fluido, tales como el factor acéntrico, factor de compresibilidad en el punto crítico y temperatura reducida, fundamentalmente. El segundo método propone una formulación específica para cada fluido, basada en el ajuste de diferentes coeficientes dentro de la ecuación de estado. Mientras que el primer procedimiento tiene una aplicación general, el segundo es aplicable únicamente a una sustancia en particular. Entre las formulaciones que adoptan el primer criterio, se han considerado para la presente investigación, además de la formulación original, las propuestas por Peng & Robinson (1980), Perez (1987), Hewitt, McMullan, Evans & Mongone (1996) y Figueira, Lugo & Olivera-Fuentes (2007).

Tabla 1. Refrigerantes estudiados junto con el rango de temperatura considerado.

Refrigerante	T min [°C]	T max [°C]	Refrigerante	T min [°C]	T max [°C]
1 R717	-60	80	8 R22	-60	80
2 R600	-60	80	9 R32	-60	74.05
3 R744	-56.15	26.95	10 R404a	-60	68.05
4 R600a	-60	80	11 R407c	-60	80
5 R1234yf	-53.15	80	12 R410a	-60	67.25
6 R12	-60	80	13 R507a	-60	66.45
7 R134a	-60	80	14 R718	0.85	80

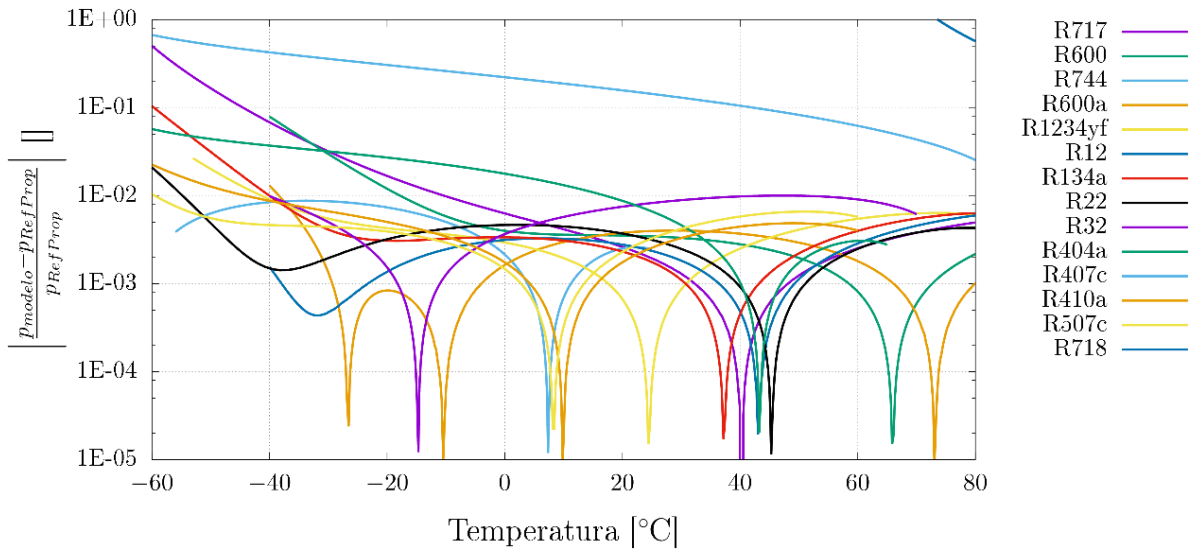


Figura 1 Error relativo absoluto para la presión calculada por la ecuación de Peng-Robinson para los distintos fluidos considerados.

Los fluidos considerados y el rango de trabajo quedan detallados en la Tabla 1. Se ha considerado desde el máximo entre el punto triple y -60°C hasta el mínimo entre el punto crítico y 80°C , tal y como se muestra en la Tabla 1. Se han considerados fluidos y rangos de trabajos empleados comúnmente en refrigeración y climatización.

Para el estudio de la ecuación de Peng-Robinson, se han considerado 500 isothermas entre el valor máximo y el mínimo mostrado para cada fluido, calculándose, para cada una de ellas, las presiones de equilibrio y densidades de líquido y vapor. Se muestra en la Figura 1 el error relativo para los diferentes refrigerantes y temperaturas considerados para la predicción de la presión. Dado que se ha tomado el valor absoluto, los mínimos indican un paso por cero.

Para cuantificar numéricamente el error se ha incluido la Tabla 2. En la misma se detalla el error relativo promedio de todas las isothermas para la presión en función de los diferentes refrigerantes y correlaciones estudiadas.

Además, se ha incluido, en la parte baja de la tabla, el error promedio para todos los refrigerantes y las propiedades de presión, densidad de líquido y vapor. El error relativo promedio se calcula de acuerdo la ecuación (2). El error mínimo para cada propiedad ha sido resaltado en la Tabla 2. Puede verse que las nuevas formulaciones no mejoran la predicción original de Peng-Robinson, a excepción de la propuesta por Pérez Casas (1987) que mejora ligeramente la predicción para la densidad de líquido.

$$Error = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{x_{ajuste} - x_{RefProp}}{x_{RefProp}} \right| \quad (2)$$

Tabla 2. Promedio del error relativo para la presión de saturación para los refrigerantes considerados en función de cinco correlaciones tipo Peng-Robinson. Se ha incluido el error total medio para todos los refrigerantes y las propiedades de presión de saturación, densidad de líquido y densidad de vapor.

Refrigerant	(Peng & Robinson, 1976)	(Peng & Robinson, 1980)	(Perez, 1987)	(Hewitt et al., 1996)	(Figueira et al., 2007)
R717	3.10E-02	2.31E-01	3.87E-02	2.03E+00	5.77E-02
R600	8.28E-03	3.17E-01	1.40E-02	1.42E+00	1.88E-01
R744	5.03E-03	1.40E-01	7.28E-03	3.25E-01	3.96E-02
R600a	2.39E-03	3.03E-01	6.83E-03	9.88E-01	1.89E-01
R1234yf	4.93E-03	1.21E-01	9.88E-03	9.76E-01	2.87E-02
R12	2.30E-03	2.58E-01	5.15E-03	6.63E-01	1.52E-01
R134a	8.24E-03	4.82E-02	1.81E-02	1.62E+00	1.50E-01
R22	3.51E-03	2.07E-01	7.64E-03	9.06E-01	7.83E-02
R32	6.40E-03	9.76E-02	7.18E-03	5.87E-01	6.94E-02
R404a	1.85E-02	1.06E-01	2.45E-02	8.20E-01	4.06E-02
R407c	1.72E-01	1.66E-01	1.81E-01	8.36E-01	6.95E-02
R410a	5.39E-03	8.98E-02	1.07E-02	8.86E-01	5.07E-02
R507a	4.13E-03	1.01E-01	8.84E-03	8.44E-01	5.29E-02
R718	4.70E-01	3.80E-01	5.10E-01	1.14E+01	2.40E-01
Total p	5.30E-02	1.83E-01	6.07E-02	1.73E+00	1.00E-01
Total $\rho_{liquido}$	6.21E-02	6.23E-02	6.19E-02	1.05E-01	7.06E-02
Total ρ_{vapor}	5.17E-02	1.97E-01	6.04E-02	1.90E+00	1.06E-01

2.2. *Proposición de expresiones simples y método de ajuste*

Una vez estudiado el comportamiento de la ecuación de estado de Peng-Robinson y las variantes consideradas, el propósito de esta sección es proponer correlaciones simples para las propiedades estudiadas con anterioridad, entre otras. La comparación del error entre la ecuación de Peng-Robinson y las correlaciones propuestas dará una magnitud de la validez de éstas. La obtención de propiedades termodinámicas de referencia se ha realizado empleando la base de datos termodinámicos RefProp, del National Institute of Standards (NIST, 2017), disponible en línea. La base de datos RefProp se basa en las funciones de Helmholtz más precisas desarrolladas hasta la fecha para cada refrigerante, pudiéndose considerar un error despreciable para el caso del cálculo de propiedades de saturación. Se consideró intervalos de 0.1°C para la obtención de datos de las diferentes isothermas.

Las propiedades termodinámicas consideradas para las correlaciones simples, junto con sus respectivas unidades, se muestran en la Tabla 3. Dado que hay que considerar las propiedades tanto para la fase líquido como para vapor, se tiene un total de 18 propiedades a evaluar. En el caso de la presión, hay que considerar que, si bien para fluidos puros y mezclas azeotrópicas el valor de presión para líquido como para vapor es el mismo, en el caso de fluidos zeotrópicos (R404a, R407c y R410a) su valor difiere, de ahí su consideración en la Tabla 3.

Tabla 3. Detalle de propiedades termodinámicas junto con las unidades consideradas.

Propiedad		
1	P _{líquido}	[kPa]
2	P _{vapor}	[kPa]
3	ρ _{líquido}	[Kg m ⁻³]
4	ρ _{vapor}	[Kg m ⁻³]
5	u _{líquido}	[J kg ⁻¹]
6	h _{líquido}	[J kg ⁻¹]
7	s _{líquido}	[J Kg ⁻¹ K ⁻¹]
8	cv _{líquido}	[J Kg ⁻¹ K ⁻¹]
9	cp _{líquido}	[J Kg ⁻¹ K ⁻¹]
10	SS _{líquido}	[m s ⁻¹]
11	μ _{JT, líquido}	[K Pa ⁻¹]
12	u _{vapor}	[J kg ⁻¹]
13	h _{vapor}	[J kg ⁻¹]
14	s _{vapor}	[J Kg ⁻¹ K ⁻¹]
15	cv _{vapor}	[J Kg ⁻¹ K ⁻¹]
16	cp _{vapor}	[J Kg ⁻¹ K ⁻¹]
17	SS _{vapor}	[m s ⁻¹]
18	μ _{JT, vapor}	[K Pa ⁻¹]

Se han propuesto un total de 13 prototipos de funciones para el ajuste de las propiedades termodinámicas consideradas, según se muestra en la Tabla 4, que engloban expresiones polinómicas, exponenciales y logarítmicas hasta con un máximo de 6 incógnitas. En base a los datos obtenidos anteriormente, se ha realizado el ajuste por mínimos cuadrados de los coeficientes de las distintas funciones, empleando para ello la librería de cálculo numérico GNU GSL (Galassi et al., 2010), programada en C. Se ha utilizado un algoritmo multiparamétrico y no lineal tipo Levenberg-Marquardt, estableciéndose el criterio de convergencia en un error relativo de 10⁻⁹ entre dos iteraciones del resolutor. Todo el proceso de tratamiento de datos y ajuste de expresiones se ha

realizado implementando el citado algoritmo en un programa escrito en C++.

La formulación completa del problema es extensa por la cantidad de casos existentes, pues se tienen 14 refrigerantes, 18 propiedades termodinámicas y 13 funciones, que hacen un total de 3,276 casos. Dada la imposibilidad de un reporte detallado para cada caso, se propone la siguiente metodología de cálculo:

1. Realizar el ajuste por mínimos cuadrados de todas las combinaciones posibles.
2. Para cada propiedad termodinámica de las listadas en la Tabla 3 se persigue obtener la función, de las mostradas en la Tabla 4, que minimice el error para todos los refrigerantes. El error está definido de acuerdo a la ecuación (2).
3. En base a las funciones elegidas para cada propiedad termodinámica según la Tabla 4, se reportarán los respectivos coeficientes y se realizará un análisis del error de ajuste para cada propiedad y refrigerante considerados en el presente estudio.

Tabla 4: Funciones propuestas para las distintas propiedades termodinámicas en función de la temperatura de saturación.

Función y número de parámetros		
1	$f_1(T) = A + B T + C T^2$	3
2	$f_2(T) = A + B T + C T^2 + D T^3$	4
3	$f_3(T) = A + B T + C T^2 + D T^3 + E T^4$	5
4	$f_4(T) = A + B T + C T^2 + D T^3 + E T^4 + F T^5$	6
5	$f_5(T) = A + B T + C T^2 + D T^3 + \frac{E}{T} + \frac{F}{T^2}$	6
6	$f_6(T) = A + B T + C T^2 + \frac{D}{T} + \frac{E}{T^2} + \frac{F}{T^3}$	6
7	$f_7(T) = (A + B T)e^{(C + D T)}$	4
8	$f_8(T) = (A + B T + C T^2)e^{(D + E T)}$	5
9	$f_9(T) = (A + B T)e^{(C + D T + \frac{E}{T})}$	5
10	$f_{10}(T) = (A + B T)e^{(C + D T + \frac{E}{T} + F \ln(T))}$	6
11	$f_{11}(T) = e^{(A + \frac{B}{T} + C \ln(T) + D T + E T^2 + \frac{F}{T^2})}$	6
12	$f_{12}(T) = A + B T^{(C+1)} + D T^{(C+2)} + E T^{(C+3)} + F T^{(C+4)}$	6
13	$f_{13}(T) = (A + B T)e^{(C + D T + \frac{E}{T} + F T^2)}$	6

3. RESULTADOS

Los resultados del proceso de ajuste para los distintos refrigerantes y propiedades se discuten en esta sección. Para dicho propósito se ha incluido la Tabla 5, en que se muestra el error relativo medio para las distintas funciones y propiedades. La primera observación es que el error relativo medio es bajo, del orden de 10⁻⁴. Teniendo en cuenta que el error relativo medio para la ecuación de

estado de Peng-Robinson es del orden de 10^{-2} , es un indicativo que es más interesante el empleo de correlaciones específicas para saturación que el de ecuaciones de estado generales.

Además, la función óptima para el mayor número de casos (12) es un polinomio de quinto orden. La función exponencial (11) también minimiza el error para cinco de propiedades termodinámicas, mientras que la función (13) únicamente lo hace para una. Es de resaltar que estas tres

funciones son de seis parámetros. Como era de esperar, añadir más términos a una serie polinómica disminuye el error de ajuste. En lo relativo a las funciones exponenciales, no existe un patrón identificable entre las distintas expresiones propuestas, existiendo incluso comportamientos opuestos para distintas propiedades termodinámicas tal y como se observa para las funciones 7 a 10.

Tabla 5. Error de ajuste para cada propiedad termodinámica para todos los refrigerantes considerados para cada una de las funciones de ajuste consideradas. Se muestra resaltada la función que minimiza el error para cada propiedad termodinámica.

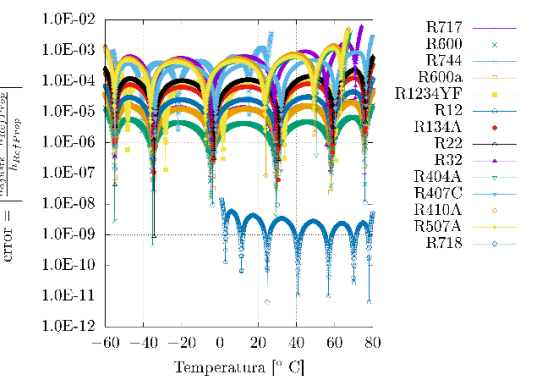
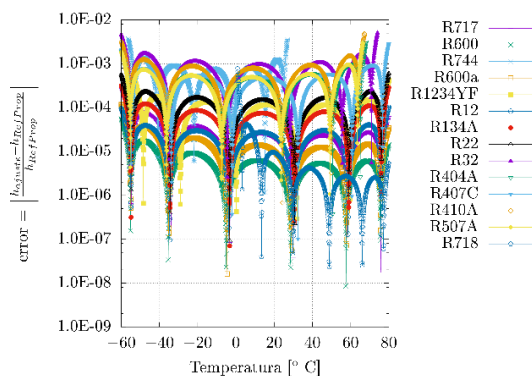
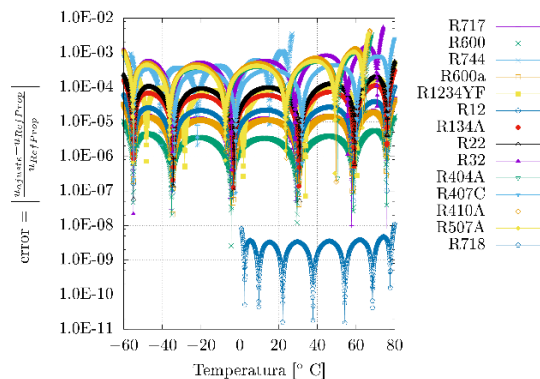
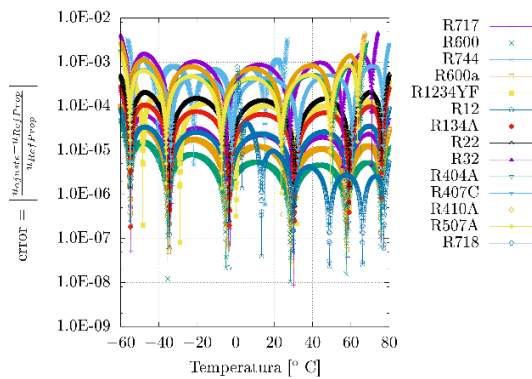
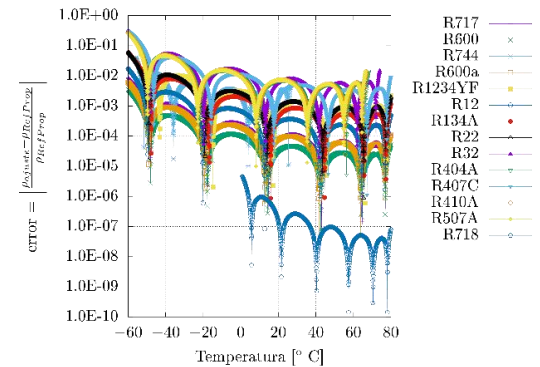
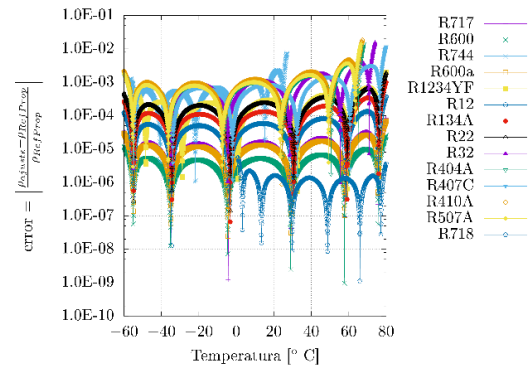
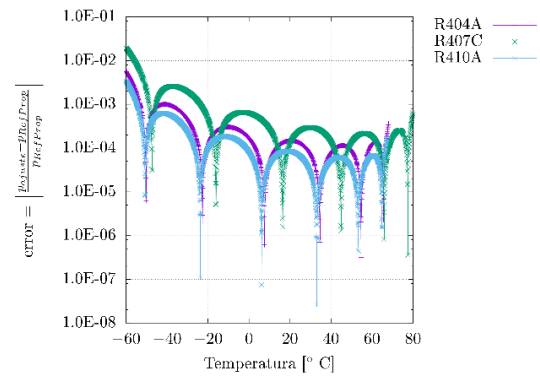
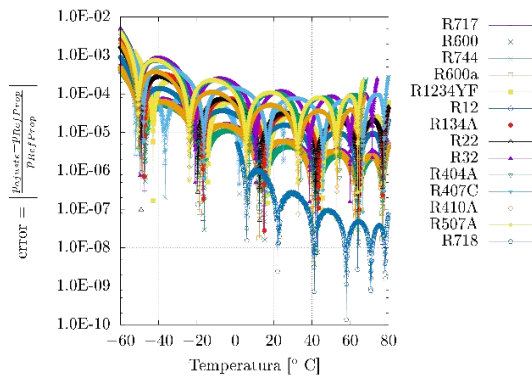
Función	Propiedad termodinámica de la fracción líquida								
	$\rho_{\text{líquido}}$	p_{vapor}	$u_{\text{líquido}}$	$h_{\text{líquido}}$	$s_{\text{líquido}}$	$cv_{\text{líquido}}$	$cp_{\text{líquido}}$	$SS_{\text{líquido}}$	$\mu_{\text{JT,líquido}}$
1	2.8E-01	2.9E-01	3.1E-03	3.7E-03	2.8E-03	4.0E-03	5.3E-02	5.3E-03	1.2E+00
2	2.1E-02	2.3E-02	1.1E-03	1.3E-03	6.7E-04	2.1E-03	3.6E-02	1.5E-03	9.9E-01
3	1.6E-03	2.2E-03	5.1E-04	5.7E-04	3.3E-04	1.2E-03	2.4E-02	8.0E-04	3.5E-01
4	5.5E-04	8.5E-04	2.5E-04	2.8E-04	1.6E-04	7.7E-04	1.7E-02	4.0E-04	3.1E-01
5	8.8E-04	1.3E-03	3.4E-04	3.8E-04	2.1E-04	9.4E-04	1.9E-02	5.3E-04	4.1E-01
6	1.9E-03	2.5E-03	3.9E-04	4.5E-04	2.5E-04	1.0E-03	2.1E-02	6.2E-04	4.5E-01
7	1.6E-01	1.6E-01	1.5E-01	3.6E-01	7.4E-02	6.4E-01	7.8E-02	5.0E-01	8.3E-01
8	8.8E-01	9.1E-01	8.0E-01	7.9E-01	4.7E-01	7.7E-01	6.7E-01	8.3E-01	1.5E+00
9	3.1E-03	3.8E-03	2.3E-01	7.8E-02	1.7E-02	7.1E-01	7.2E-01	5.0E-01	3.0E-01
10	6.5E-02	6.5E-02	4.0E-01	5.1E-01	1.8E-02	7.1E-01	7.9E-01	5.7E-01	5.2E-01
11	1.3E-04	2.2E-04	2.4E-03	2.5E-03	2.3E-03	9.0E-04	1.3E-02	2.2E-03	9.6E-01
12	7.1E-02	7.2E-02	4.5E-04	4.9E-04	3.2E-04	1.0E-03	2.0E-02	3.3E-02	3.8E-01
13	3.6E-04	6.0E-04	7.2E-02	8.3E-04	4.8E-04	6.4E-01	7.2E-01	9.3E-03	1.9E-01
Mínimo	1.3E-04	2.2E-04	2.5E-04	2.8E-04	1.6E-04	7.7E-04	1.3E-02	4.0E-04	1.9E-01

Función	Propiedad termodinámica de la fracción vapor								
	$\rho_{\text{líquido}}$	p_{vapor}	u_{vapor}	h_{vapor}	s_{vapor}	cv_{vapor}	cp_{vapor}	SS_{vapor}	$\mu_{\text{JT,vapor}}$
1	4.9E-03	4.7E-01	2.2E-03	2.6E-03	2.5E-03	5.0E-03	1.1E-01	3.8E-03	4.1E-02
2	1.9E-03	1.4E-01	8.1E-04	9.1E-04	5.2E-04	2.4E-03	7.6E-02	8.0E-04	9.1E-03
3	9.0E-04	5.8E-02	3.7E-04	4.2E-04	2.9E-04	1.1E-03	5.1E-02	3.2E-04	3.1E-03
4	4.6E-04	2.7E-02	1.8E-04	2.0E-04	1.3E-04	5.9E-04	3.5E-02	1.4E-04	6.9E-04
5	6.2E-04	3.8E-02	2.5E-04	2.8E-04	1.8E-04	7.7E-04	4.1E-02	2.0E-04	7.9E-04
6	7.2E-04	4.6E-02	2.9E-04	3.3E-04	2.1E-04	8.9E-04	4.4E-02	2.5E-04	8.7E-04
7	4.2E-03	6.2E-02	6.4E-01	7.1E-01	6.4E-01	7.5E-03	1.6E-01	5.0E-01	1.4E-01
8	5.7E-01	2.3E+00	9.3E-01	9.3E-01	9.0E-01	6.4E-01	6.5E-01	6.9E-01	3.0E-01
9	1.9E-03	7.1E-02	1.4E-01	2.1E-01	5.0E-01	1.5E-01	5.5E-01	5.0E-01	8.2E-02
10	8.4E-04	1.3E-01	6.4E-01	5.7E-01	5.7E-01	2.4E-03	6.0E-01	6.4E-01	4.7E-03
11	9.8E-04	8.6E-03	2.8E-04	3.2E-04	2.2E-04	6.4E-04	1.9E-02	3.7E-04	1.1E-03
12	7.1E-04	3.6E-02	3.0E-04	3.4E-04	4.6E-03	9.9E-04	3.8E-02	2.6E-04	3.5E-03
13	3.5E-03	1.0E-01	7.2E-02	7.3E-02	7.8E-04	5.0E-01	5.3E-01	2.0E-03	7.3E-02
Mínimo	4.6E-04	8.6E-03	1.8E-04	2.0E-04	1.3E-04	5.9E-04	1.9E-02	1.4E-04	6.9E-04

Una discusión en más profundidad puede realizarse si se considera el error relativo para cada temperatura y refrigerante. Este procedimiento da una estimación del error local, mientras que el obtenido de la Tabla 5 se puede considerar como un error medio en todo el intervalo. Dichas gráficas se han incluido en la Figura 2 (gráficas de la 2a a la 2r) para las diferentes propiedades termodinámicas consideradas y la función 4, que es la que minimiza el error para un mayor número de casos. Los

siguientes comentarios se pueden realizar con relación a dicha Figura.

1. En el caso de la presión, como se comentó anteriormente, para los fluidos zeotrópicos existe diferencia entre la presión de líquido y vapor para una misma temperatura, de aquí el hecho de que únicamente se incluyan en la Figura 2b la familia de los R4xx, pues para el resto de refrigerantes el gráfico sería idéntico al mostrado en la Figura 2a.



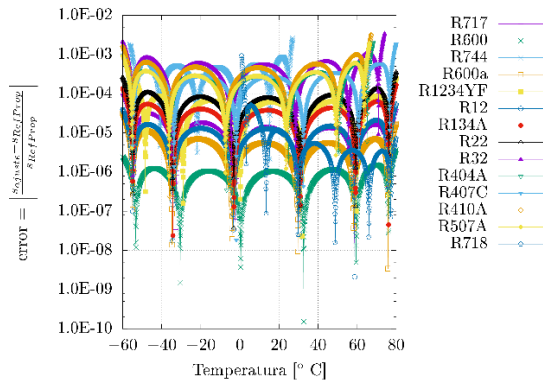


Figura 2i. Error de ajuste para la entropía de líquido para la función 4. Todos los refrigerantes.

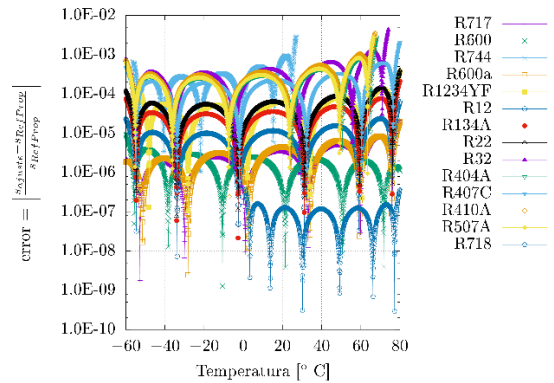


Figura 2j. Error de ajuste para la entropía de vapor para la función 4. Todos los refrigerantes.

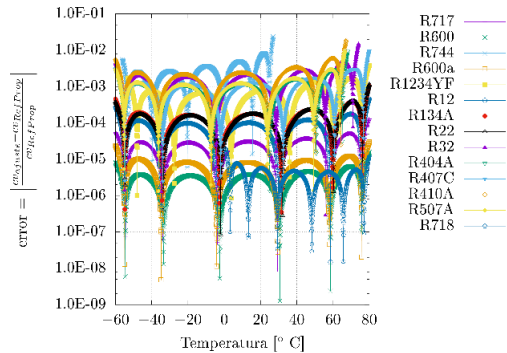


Figura 2k. Error de ajuste para el cv de líquido para la función 4. Todos los refrigerantes.

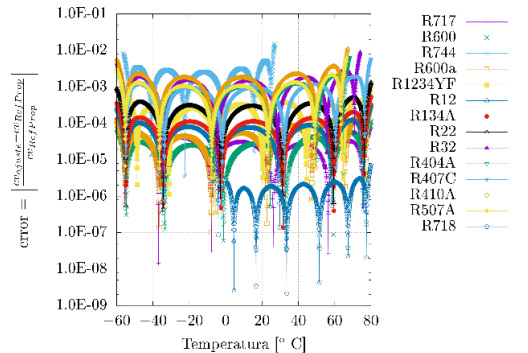


Figura 2l. Error de ajuste para el cv de vapor para la función 4. Todos los refrigerantes.

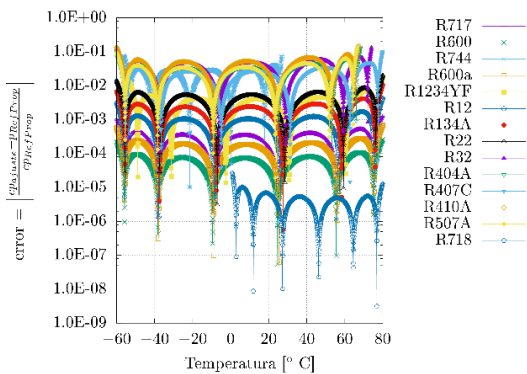


Figura 2m. Error de ajuste para el cp de líquido para la función 11. Todos los refrigerantes.

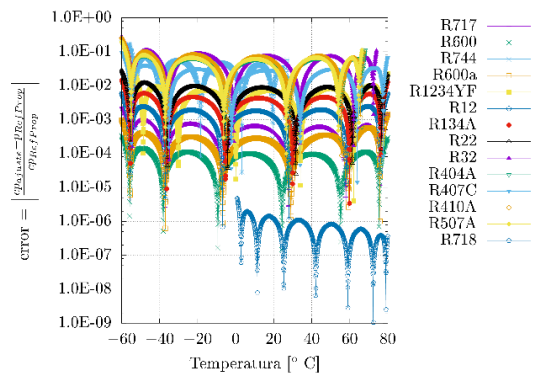


Figura 2n. Error de ajuste para el cp de vapor para la función 11. Todos los refrigerantes.

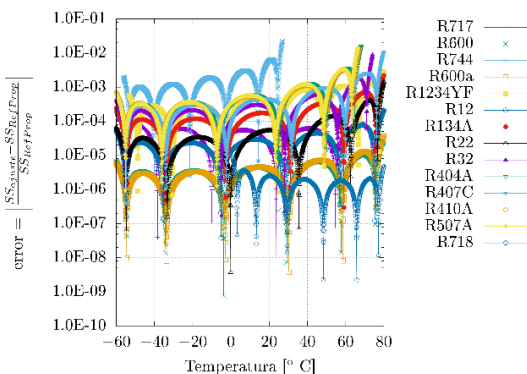


Figura 2o. Error de ajuste para la velocidad del sonido de líquido para la función 4. Todos los refrigerantes.

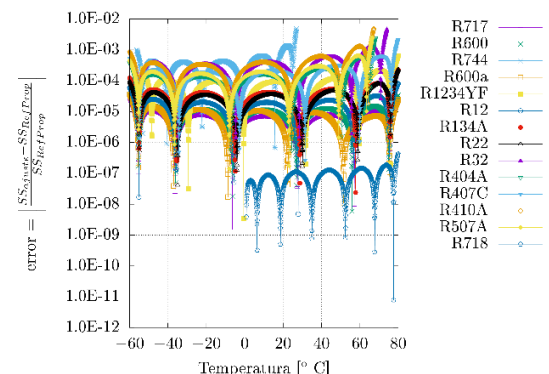


Figura 2p. Error de ajuste para la velocidad de sonido de vapor para la función 4. Todos los refrigerantes.

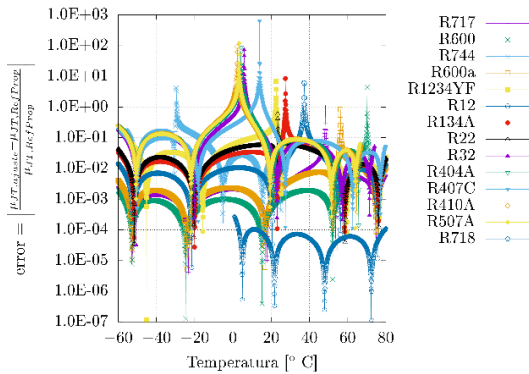


Figura 2q. Error de ajuste para el coeficiente de Joule-Thomson de líquido para la función 13. Todos los refrigerantes.

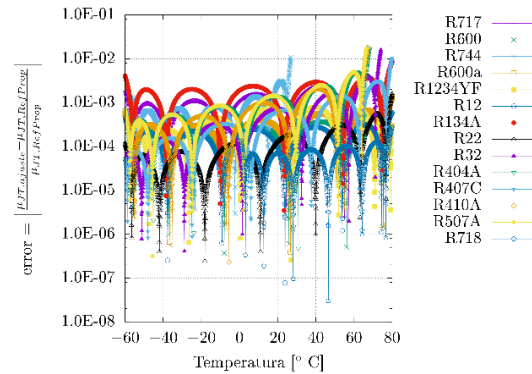


Figura 2r. Error de ajuste para el coeficiente de Joule-Thomson de vapor para la función 4. Todos los refrigerantes.

Figura 2. Error de ajuste de para las distintas propiedades termodinámicas y refrigerantes.

- La morfología de todas las curvas responde al hecho de que se ha tomado el valor absoluto en la ecuación de error, siendo cada mínimo de las curvas un paso por cero del error.
- Globalmente, el comportamiento de cada función para cada uno de los refrigerantes es similar, encontrándose los pasos por cero aproximadamente en las mismas temperaturas. Se puede observar que el número de pasos por cero coincide con el número de parámetros de la función de ajuste, es decir, seis. Aquí hay que detallar dos peculiaridades. La primera es que, para el agua, dado que el intervalo de temperaturas considerado es inferior que para el resto de refrigerantes, el error cometido en el ajuste es por regla general menor. Relacionada con ésta, para los refrigerantes R744, R404a, R410a y R507a existe una ligera desviación hacia la temperatura de punto crítico (fin de las curvas). El tratamiento del punto crítico es un fenómeno complejo, pues tanto la medición de propiedades, así como el ajuste de ecuaciones se convierten en problemas no triviales (Span, 2000).
- No se pueden observar tendencias que relacionen el error con la temperatura, de lo que se deduce que la predicción de las propiedades oscila alrededor del valor obtenido de RefProp, siendo la amplitud de dichas oscilaciones simétrica e independiente de la temperatura.
- También se puede observar que, para las distintas funciones termodinámicas, el error cometido para los distintos refrigerantes lleva casi siempre el mismo orden. Así, por ejemplo, se puede observar que para el R600 y el R600a se encuentra, para la mayor parte de las gráficas, errores bajos, mientras que el R32 y el R407c siempre tienen errores altos. Este fenómeno brinda una idea novedosa en el sentido de que la dificultad de ajuste de una propiedad no es aislada, sino que es traducible a todas las propiedades termodinámicas del fluido considerado.
- El comportamiento de la energía interna y entalpía de líquido es muy similar debido a que dichas propiedades toman valores similares a lo largo de todo el rango de temperaturas.

- El comportamiento de la curva de error para el coeficiente de Joule-Thomson para líquido es peculiar, existiendo errores relativos anormalmente altos. El motivo es que dicho coeficiente pasa de valores negativos –a bajas temperaturas– a valores positivos –a altas temperaturas. La transición por cero crea una singularidad en la ecuación (1), motivo por el cual aparecen los altos valores de error relativo en la Figura 2q.

Dado que la función 4 es la que minimiza el error para el mayor número de propiedades, se ha elegido ésta para mostrar los seis coeficientes de ajuste para las distintas propiedades de cada fluido en el Anexo A, con un valor de 5 cifras significativas. El Anexo A es una herramienta de utilidad, ya que condensa los productos de la presente investigación en unos coeficientes que, aplicados a la morfología de la función 4, permiten obtener datos termodinámicos para 14 refrigerantes y 18 propiedades termodinámicas. La incertidumbre media para cada una de estas ecuaciones se muestra en la Tabla 5, mientras que la estimación local se puede obtener a partir de las Figuras 2a a 2r.

4. CONCLUSIONES

En la presente investigación se ha escogido la expresión óptima entre una base de funciones propuestas para el ajuste de diferentes propiedades termodinámicas en saturación de refrigerantes comunes. Se ha comprobado que el uso de funciones específicas para saturación da mejores resultados que ecuaciones de estado cúbicas tipo Peng-Robinson y derivados que modelan todo el diagrama p-v-T. Globalmente se ha encontrado que las mejores funciones son polinomios puros o expresiones tipo exponenciales. La incertidumbre alcanzada en el proceso de ajuste es satisfactoria, encontrándose errores relativos promedios del orden de 10^{-4} . El análisis de la incertidumbre local ha demostrado que ésta es oscilatoria a lo largo del rango de temperatura considerado, siendo su valor función del refrigerante considerado. Además, se ha encontrado que la dificultad para ajustar una propiedad termodinámica de un refrigerante no es aislada, sino que, por regla general, está asociada a ajustes menos

significativos para el resto de propiedades termodinámicas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la "Dirección de Investigación y Desarrollo-UTA" por proporcionar financiamiento para el desarrollo de la presente investigación a través del proyecto 2441-CU-P-2015.

POLÍTICA DE REPRODUCIBILIDAD

El autor de este trabajo tiene la política de hacer los códigos empleados abiertos. Es por ello que las rutinas en C++ empleadas para resolver las ecuaciones de Peng-Robinson están disponibles en línea a través de Mendeley bajo licencia CC-BY-4.0 (García del Valle, 2018).

NOMENCLATURA

C_p	calor específico a presión constante [$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]
C_v	calor específico a volumen constante [$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]
H	entalpía [kJ kg^{-1}]
P	presión [kPa]
U	energía interna [kJ kg^{-1}]
S	entropía [$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]
T	temperatura [K]
V	volumen específico [$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$]
SS	velocidad del sonido [m s^{-1}]
μ_{JT}	coeficiente de Joule-Thomson [K Pa^{-1}]
ρ	densidad [kg m^{-3}]

BIBLIOGRAFÍA

- Affandia, M., Mamat, N., Kanafiah, S. N. & Khalid, N. S. (2013). Simplified equations for saturated steam properties for simulation purposes. *Procedia Engineering*, 53, 722-726.
- Atalay, H. & Coban, M. T. (2015). Modeling of thermodynamic properties for pure refrigerants and refrigerant mixtures by using the Helmholtz equation of state and cubic spline curve fitting method. *Universal Journal of Mechanical Engineering*, 3(6), 229-251.
- Bell, I. H., Wronski, J., Quoilin, S. & Lemort, V. (2014). Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library CoolProp. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(6), 2498-2508.
- Brown, J. S. (2007). Predicting performance of refrigerants using the Peng-Robinson Equation of State. *International Journal of Refrigeration*, 30(8), 1319-1328.
- CAREL Industries S.p.A. (2017). *Sistemas de válvulas de expansión electrónicas a pasos y controlador de recalentamiento de gas*. Descargado de www.carel.es/electronic-expansion-valve

- Cleland, A. C. (1994). Polynomial curve-fits for refrigerant thermodynamic properties: extension to include R134a. *International Journal of Refrigeration*, 17(4), 245-249.
- DuPont TM Suva® (2017). *Thermodynamic properties of HFC-134a (1,1,1,2-tetrafluoroethane)*. Technical Bulletin. Descargado de https://www.chemours.com/Refrigerants/en_US/products/Freon/Freon-134a.html
- Figueira, F. L., Lugo, L. & Olivera-Fuentes, C. (2007). Generalized parameters of the Stryjek-Vera and Gibbons-Laughton cohesion functions for use with cubic EOS of the van der Waals type. *Fluid Phase Equilibria*, 259, 105-115.
- Galassi, M., Davies, J., Theiler, J., Gough, B., Jungman, G., Alken, P., Booth, M. & Rossi, F. (2010). *GNU Scientific Library*. Descargado de <http://gnu.org/gsl>
- García del Valle, J. (2018). *C++ program for computing the liquid-vapor equilibrium using cubic Equations of State*, Mendeley Data, v1. <http://dx.doi.org/10.17632/st4dss5f22.1>
- Hewitt, N. J., McMullan, J. T., Evans, R. H. & Mongoney, B. (1996). Martin-Hou, Peng-Robinson and Redlich-Kwong-Soave equations of state for HFC 125. *International Journal of Energy Research*, 20, 33-39.
- Iglesias-Silva, G. A., Miller, R. C., Ceballos, A. D., Hall, K. R. & Holste, J. C. (1995). Accurate vapor pressure equation for refrigerants. *Fluid Phase Equilibria*, 111, 203-212.
- Lopez-Echeverry, J. S., Reif-Acerman, S. & Araujo-Lopez, E. (2017). Peng-Robinson equation of state: 40 years through cubics. *Fluid Phase Equilibria*, 447, 39-71.
- NIST. (2017). *Librería REFPROP "Refrigerants Properties" del National Institute of Standards (USA)*. Descargado de <https://www.nist.gov/srd/refprop>
- Peng, D. Y. & Robinson, D. B. (1976). A new two constant equation of state. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 15(1), 59-64.
- Peng, D. Y. & Robinson, D. B. (1980). *Two- and three-phase equilibrium calculations for coal gasification and related processes*. In: Newman, S. A., Barner, H. E., Klein, M. & Sandler, S. I. (Eds.). *Thermodynamics of aqueous systems with industrial applications*. Washington, D.C., US: American Chemical Society, 393-414.
- Pérez Casas, J. M. (1987). La ecuación de estado de Peng-Robinson en la industria petroquímica. *Ingeniería Química*, 223, 461-465.
- Poling, B. E., Prausnitz, J. M. & O'Connell, J. P. (2001). *The properties of gases and liquids*, 5th Ed. Nueva York, EE.UU.: McGrawHill, 803 pp.
- Span, R. (2000). *Multiparameter equations of state, an accurate source of thermodynamic property data*. Bochum, Alemania: Springer, 367 pp.
- Vikrant, A. & Radermacher, R. (2014). *Standardized Polynomials for Fast Evaluation of Refrigerant Thermophysical Properties*. International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue University, Illinois, USA.
- Wolfgang, W. & Kretschmar, H. J. (2008). *International steam tables properties of water and steam based on*

the industrial formulation IAPWS-IF97 IAPWS steam properties. Berlin, Alemania: Springer, 392 pp.

YellowJacket. (2017). *Analizador/recuperador de gas para sistemas frigoríficos*. Descargado de: <http://yellowjacket.com/product/refrigeration-system-analyzer>

Zhao, D., Ding, G. & Wu, Z. (2009). Extension of the implicit curve-fitting method for fast calculation of thermodynamic properties of refrigerants in supercritical region. *International Journal of Refrigeration*, 32(7), 1615-1625.

ANEXO A

Coefficientes de ajuste para la función 4 para las diferentes propiedades termodinámicas de los distintos refrigerantes. La forma de la ecuación 4 es: $f_4(T) = A + B T + C T^2 + D T^3 + E T^4 + F T^5$. Las unidades de entrada son grados Kelvin y las de salida son las consideradas en la Tabla 3 para cada propiedad termodinámica.

Refrigerante	Propiedad	A	B	C	D	E	F
R717	$\rho_{\text{líquido}}$	6,85929E+03	-1,51099E+02	1,27688E+00	-5,03074E-03	8,58622E-06	-3,74710E-09
	p_{vapor}	6,85929E+03	-1,51099E+02	1,27688E+00	-5,03074E-03	8,58622E-06	-3,74710E-09
	$\rho_{\text{líquido}}$	1,28990E+03	-9,00308E+00	6,99612E-02	-2,98586E-04	6,22496E-07	-5,20951E-10
	ρ_{vapor}	-5,94073E+02	1,13842E+01	-8,71797E-02	3,34827E-04	-6,49990E-07	5,17616E-10
	$u_{\text{líquido}}$	-1,08597E+06	1,12225E+04	-6,80951E+01	3,08557E-01	-6,66636E-04	5,69730E-07
	$h_{\text{líquido}}$	-1,18030E+06	1,30453E+04	-8,22651E+01	3,64336E-01	-7,79043E-04	6,63974E-07
	$s_{\text{líquido}}$	-7,30836E+03	6,83486E+01	-2,80087E-01	9,04809E-04	-1,71870E-06	1,40454E-09
	$cv_{\text{líquido}}$	2,06822E+03	2,68777E+01	-2,62531E-01	1,17711E-03	-2,60454E-06	2,29362E-09
	$cp_{\text{líquido}}$	-5,91495E+04	1,17928E+03	-8,87389E+00	3,37186E-02	-6,45426E-05	4,98803E-08
	$ss_{\text{líquido}}$	1,18401E+04	-1,47300E+02	9,37360E-01	-3,13941E-03	5,30046E-06	-3,64157E-09
	$\mu_{T,\text{líquido}}$	-1,69927E-05	3,18243E-07	-2,42844E-09	9,30350E-12	-1,78864E-14	1,38629E-17
	u_{vapor}	2,53104E+06	-2,61492E+04	2,11146E+02	-7,97306E-01	1,49642E-03	-1,14575E-06
	h_{vapor}	2,86671E+06	-3,19781E+04	2,57913E+02	-9,67571E-01	1,80512E-03	-1,38060E-06
	s_{vapor}	3,57966E+04	-3,86441E+02	2,19045E+00	-6,68304E-03	1,06676E-05	-7,07854E-09
	cv_{vapor}	-7,31339E+03	1,77515E+02	-1,40076E+00	5,35907E-03	-9,84284E-06	7,12248E-09
	cp_{vapor}	-1,35992E+05	2,65589E+03	-2,03628E+01	7,77123E-02	-1,47711E-04	1,12462E-07
	ss_{vapor}	4,50021E+02	-4,81673E+00	4,60222E-02	-1,75340E-04	3,20307E-07	-2,47882E-10
	$\mu_{T,\text{vapor}}$	9,05729E-03	-1,39844E-04	8,82111E-07	-2,81762E-09	4,53555E-12	-2,93450E-15
R600	$\rho_{\text{líquido}}$	2,41124E+03	-5,13092E+01	4,23808E-01	-1,65934E-03	2,91469E-06	-1,52695E-09
	p_{vapor}	2,41124E+03	-5,13092E+01	4,23808E-01	-1,65934E-03	2,91469E-06	-1,52695E-09
	$\rho_{\text{líquido}}$	1,08361E+03	-5,29683E+00	3,40331E-02	-1,32253E-04	2,58622E-07	-2,10237E-10
	ρ_{vapor}	-2,15817E+02	4,08809E+00	-3,09600E-02	1,18161E-04	-2,31162E-07	1,91102E-10
	$u_{\text{líquido}}$	-4,65160E+05	4,09703E+03	-1,62053E+01	5,93239E-02	-1,02893E-04	7,80925E-08
	$h_{\text{líquido}}$	-4,75107E+05	4,28948E+03	-1,77206E+01	6,54857E-02	-1,16101E-04	9,02950E-08
	$s_{\text{líquido}}$	-3,86241E+03	4,19162E+01	-1,79372E-01	5,05799E-04	-7,65460E-07	4,92670E-10
	$cv_{\text{líquido}}$	1,06594E+03	1,14741E+01	-1,23388E-01	5,80464E-04	-1,17816E-06	9,04000E-10
	$cp_{\text{líquido}}$	-4,22034E+03	1,22056E+02	-9,65891E-01	3,81400E-03	-7,40722E-06	5,76354E-09
	$ss_{\text{líquido}}$	3,06472E+03	-1,48271E+01	6,91872E-02	-2,69670E-04	5,44756E-07	-4,46086E-10
	$\mu_{T,\text{líquido}}$	-1,24668E-05	2,30899E-07	-1,79529E-09	6,98851E-12	-1,35821E-14	1,06289E-17
	u_{vapor}	4,20401E+05	-2,09594E+03	2,20800E+01	-7,95765E-02	1,55465E-04	-1,25707E-07
	h_{vapor}	4,69726E+05	-2,84883E+03	2,84283E+01	-1,01567E-01	1,93726E-04	-1,55110E-07
	s_{vapor}	9,61289E+03	-9,82335E+01	5,46356E-01	-1,57719E-03	2,39015E-06	-1,51030E-09
	cv_{vapor}	7,74265E+02	2,52828E+00	-1,72890E-02	1,06197E-04	-1,87034E-07	1,12202E-10
	cp_{vapor}	-7,80016E+03	1,70927E+02	-1,31484E+00	5,09606E-03	-9,78895E-06	7,55808E-09
	ss_{vapor}	2,72812E+02	-3,11456E+00	2,71312E-02	-1,00128E-04	1,81159E-07	-1,40758E-10
	$\mu_{T,\text{vapor}}$	2,50846E-03	-3,51675E-05	2,06161E-07	-6,20101E-10	9,48192E-13	-5,85763E-16

R744	Plíquido	-1,61910E+05	3,25819E+03	-2,60720E+01	1,03847E-01	-2,07503E-04	1,70599E-07
	p _{vapor}	-1,61910E+05	3,25819E+03	-2,60720E+01	1,03847E-01	-2,07503E-04	1,70599E-07
	ρ _{líquido}	2,66629E+05	-5,33560E+03	4,28915E+01	-1,72251E-01	3,45474E-04	-2,76982E-07
	ρ _{vapor}	-2,62571E+05	5,28851E+03	-4,25391E+01	1,70838E-01	-3,42639E-04	2,74711E-07
	u _{líquido}	-4,65635E+07	9,32418E+05	-7,48006E+03	3,00240E+01	-6,01932E-02	4,82440E-05
	h _{líquido}	-5,33913E+07	1,06998E+06	-8,58706E+03	3,44723E+01	-6,91229E-02	5,54143E-05
	Slíquido	-1,73392E+05	3,45557E+03	-2,76148E+01	1,10590E-01	-2,21395E-04	1,77242E-07
	CV _{líquido}	-6,38627E+05	1,27118E+04	-1,00829E+02	3,99114E-01	-7,88690E-04	6,22669E-07
	CP _{líquido}	-3,40015E+07	6,79976E+05	-5,42711E+03	2,16106E+01	-4,29348E-02	3,40496E-05
	SS _{líquido}	2,02634E+05	-3,92295E+03	3,05776E+01	-1,19158E-01	2,31880E-04	-1,80428E-07
	μ _{JT, líquido}	-6,61280E-03	1,32968E-04	-1,06763E-06	4,27906E-09	-8,56204E-12	6,84370E-15
	u _{vapor}	6,62600E+07	-1,32857E+06	1,06936E+04	-4,29579E+01	8,61803E-02	-6,91149E-05
	h _{vapor}	7,93067E+07	-1,59147E+06	1,28122E+04	-5,14743E+01	1,03275E-01	-8,28366E-05
	S _{vapor}	2,61836E+05	-5,18184E+03	4,14444E+01	-1,65879E-01	3,31938E-04	-2,65686E-07
	CV _{vapor}	-8,62491E+05	1,73123E+04	-1,38660E+02	5,54277E-01	-1,10584E-03	8,81180E-07
	CP _{vapor}	-5,76756E+07	1,15315E+06	-9,20174E+03	3,66332E+01	-7,27635E-02	5,76900E-05
	SS _{vapor}	3,48028E+04	-6,94560E+02	5,55965E+00	-2,21807E-02	4,41414E-05	-3,50961E-08
	μ _{JT, vapor}	7,44893E-03	-1,44523E-04	1,13341E-06	-4,46597E-09	8,82211E-12	-6,98269E-15
R600a	Plíquido	1,15706E+03	-2,99754E+01	2,86963E-01	-1,25335E-03	2,35059E-06	-1,16068E-09
	p _{vapor}	1,15706E+03	-2,99754E+01	2,86963E-01	-1,25335E-03	2,35059E-06	-1,16068E-09
	ρ _{líquido}	1,34445E+03	-1,06220E+01	7,53538E-02	-2,93101E-04	5,71205E-07	-4,54490E-10
	ρ _{vapor}	-4,97442E+02	9,49930E+00	-7,23550E-02	2,75930E-04	-5,31858E-07	4,22703E-10
	u _{líquido}	-4,72717E+05	4,91097E+03	-2,54073E+01	1,01379E-01	-1,92344E-04	1,52118E-07
	h _{líquido}	-4,98305E+05	5,40130E+03	-2,91835E+01	1,16118E-01	-2,21929E-04	1,77110E-07
	Slíquido	-3,48312E+03	3,83606E+01	-1,70376E-01	5,17799E-04	-8,52265E-07	5,97495E-10
	CV _{líquido}	-4,89179E+02	3,18048E+01	-2,42037E-01	9,50410E-04	-1,78334E-06	1,31908E-09
	CP _{líquido}	-1,56964E+04	3,32188E+02	-2,53260E+00	9,70264E-03	-1,85247E-05	1,41955E-08
	SS _{líquido}	3,46702E+03	-2,07330E+01	1,01108E-01	-3,63990E-04	6,96124E-07	-5,54508E-10
	μ _{JT, líquido}	-3,30993E-05	6,22887E-07	-4,77866E-09	1,83434E-11	-3,51906E-14	2,71048E-17
	u _{vapor}	6,46563E+05	-6,52101E+03	5,41500E+01	-1,98313E-01	3,76726E-04	-2,91741E-07
	h _{vapor}	7,36607E+05	-8,06331E+03	6,65612E+01	-2,43315E-01	4,58233E-04	-3,53876E-07
	S _{vapor}	9,93825E+03	-1,08370E+02	6,29739E-01	-1,90332E-03	3,01556E-06	-1,98777E-09
	CV _{vapor}	2,38496E+03	-3,38063E+01	2,77146E-01	-1,04062E-03	2,00113E-06	-1,53114E-09
	CP _{vapor}	-2,21295E+04	4,38267E+02	-3,32623E+00	1,26754E-02	-2,40715E-05	1,83387E-08
	SS _{vapor}	3,48570E+02	-4,59087E+00	3,87432E-02	-1,45397E-04	2,68531E-07	-2,09805E-10
	μ _{JT, vapor}	1,99438E-03	-2,74859E-05	1,57993E-07	-4,63886E-10	6,88676E-13	-4,10151E-16
R1234YF	Plíquido	-8,52604E+03	1,46821E+02	-9,92640E-01	3,36479E-03	-6,12556E-06	5,47476E-09
	p _{vapor}	-8,52604E+03	1,46821E+02	-9,92640E-01	3,36479E-03	-6,12556E-06	5,47476E-09
	ρ _{líquido}	2,25499E+04	-3,88612E+02	2,87336E+00	-1,06541E-02	1,97073E-05	-1,45888E-08
	ρ _{vapor}	-1,71651E+04	3,21123E+02	-2,39528E+00	8,91077E-03	-1,65574E-05	1,23323E-08
	u _{líquido}	-1,66652E+06	3,08786E+04	-2,24985E+02	8,40900E-01	-1,55805E-03	1,15349E-06
	h _{líquido}	-1,87780E+06	3,48288E+04	-2,54454E+02	9,50677E-01	-1,76277E-03	1,30710E-06
	Slíquido	-5,75921E+03	1,02651E+02	-7,09325E-01	2,59146E-03	-4,76070E-06	3,50631E-09
	CV _{líquido}	-2,40719E+04	4,50083E+02	-3,28922E+00	1,20515E-02	-2,20205E-05	1,60356E-08
	CP _{líquido}	-3,26228E+05	6,07748E+03	-4,49898E+01	1,65934E-01	-3,04858E-04	2,23290E-07
	SS _{líquido}	1,70871E+04	-2,81002E+02	2,00160E+00	-7,26101E-03	1,32032E-05	-9,62402E-09
	μ _{JT, líquido}	-9,12546E-04	1,69615E-05	-1,25691E-07	4,64000E-10	-8,53485E-13	6,26151E-16
	u _{vapor}	2,18123E+06	-3,66064E+04	2,76547E+02	-1,02907E+00	1,92025E-03	-1,43862E-06
	h _{vapor}	2,58895E+06	-4,41573E+04	3,33287E+02	-1,23921E+00	2,30847E-03	-1,72745E-06
	S _{vapor}	1,05267E+04	-1,51920E+02	1,05212E+00	-3,71096E-03	6,65746E-06	-4,84253E-09
	CV _{vapor}	4,58033E+03	-6,77224E+01	4,14491E-01	-1,10815E-03	1,20773E-06	-2,26141E-10
	CP _{vapor}	-5,42802E+05	1,00873E+04	-7,46180E+01	2,74969E-01	-5,04766E-04	3,69443E-07
	SS _{vapor}	1,11277E+03	-1,94262E+01	1,47882E-01	-5,49623E-04	1,01665E-06	-7,64780E-10
	μ _{JT, vapor}	1,16094E-03	-1,37747E-05	6,87591E-08	-1,78778E-10	2,42590E-13	-1,36601E-16

R12	p _{líquido}	-2,04559E+03	2,67154E+01	-1,00412E-01	2,57114E-05	2,22566E-07	5,16485E-10
	p _{vapor}	-2,04559E+03	2,67154E+01	-1,00412E-01	2,57114E-05	2,22566E-07	5,16485E-10
	ρ _{líquido}	6,55233E+03	-8,76702E+01	6,52373E-01	-2,49486E-03	4,77033E-06	-3,67860E-09
	ρ _{vapor}	-4,27543E+03	8,18071E+01	-6,23933E-01	2,37483E-03	-4,52892E-06	3,49375E-09
	u _{líquido}	-3,17017E+05	6,46020E+03	-4,37824E+01	1,68111E-01	-3,19851E-04	2,45495E-07
	h _{líquido}	-3,61109E+05	7,30324E+03	-5,02219E+01	1,92760E-01	-3,67453E-04	2,83074E-07
	s _{líquido}	-1,63006E+03	2,98156E+01	-1,72604E-01	5,94412E-04	-1,06881E-06	7,89043E-10
	cv _{líquido}	-2,14639E+03	5,16160E+01	-4,03052E-01	1,57859E-03	-3,06584E-06	2,36731E-09
	cp _{líquido}	-3,86126E+04	7,50708E+02	-5,70386E+00	2,16128E-02	-4,08207E-05	3,07993E-08
	ss _{líquido}	3,31248E+03	-3,24414E+01	2,08787E-01	-7,92124E-04	1,54351E-06	-1,22710E-09
	μ _{JT, líquido}	-1,44835E-04	2,75310E-06	-2,09501E-08	7,95029E-11	-1,50514E-13	1,13952E-16
	u _{vapor}	6,93567E+05	-8,36039E+03	6,53410E+01	-2,44585E-01	4,62465E-04	-3,54695E-07
	h _{vapor}	8,01344E+05	-1,03469E+04	8,08751E+01	-3,02761E-01	5,71054E-04	-4,37421E-07
	s _{vapor}	5,97144E+03	-6,63074E+01	4,15998E-01	-1,36002E-03	2,30466E-06	-1,61162E-09
	cv _{vapor}	-2,48917E+03	5,06315E+01	-3,68213E-01	1,37624E-03	-2,57260E-06	1,92968E-09
	cp _{vapor}	-6,04430E+04	1,15408E+03	-8,72868E+00	3,29337E-02	-6,19532E-05	4,65516E-08
	ss _{vapor}	3,30429E+02	-4,89038E+00	4,01688E-02	-1,52004E-04	2,83245E-07	-2,19578E-10
	μ _{JT, vapor}	2,22926E-03	-3,27476E-05	1,99804E-07	-6,21222E-10	9,76570E-13	-6,17323E-16
R134a	p _{líquido}	-3,43265E+03	5,11464E+01	-2,85189E-01	8,18183E-04	-1,73722E-06	2,64987E-09
	p _{vapor}	-3,43265E+03	5,11464E+01	-2,85189E-01	8,18183E-04	-1,73722E-06	2,64987E-09
	ρ _{líquido}	1,04147E+04	-1,63089E+02	1,22568E+00	-4,66984E-03	8,89053E-06	-6,80142E-09
	ρ _{vapor}	-8,63806E+03	1,64641E+02	-1,25100E+00	4,74263E-03	-8,99268E-06	6,85587E-09
	u _{líquido}	-8,64043E+05	1,53934E+04	-1,09384E+02	4,18292E-01	-7,95864E-04	6,08980E-07
	h _{líquido}	-9,70622E+05	1,74282E+04	-1,24898E+02	4,77468E-01	-9,09249E-04	6,96892E-07
	s _{líquido}	-3,71486E+03	6,05249E+01	-3,81733E-01	1,36030E-03	-2,49566E-06	1,86367E-09
	cv _{líquido}	-4,53068E+03	1,00472E+02	-7,65262E-01	2,92056E-03	-5,53665E-06	4,18471E-09
	cp _{líquido}	-1,30528E+05	2,49321E+03	-1,88075E+01	7,06739E-02	-1,32299E-04	9,88059E-08
	ss _{líquido}	5,89487E+03	-7,64623E+01	5,18680E-01	-1,88782E-03	3,46397E-06	-2,56243E-09
	μ _{JT, líquido}	-2,76358E-04	5,23899E-06	-3,96297E-08	1,49355E-10	-2,80556E-13	2,10392E-16
	u _{vapor}	1,52579E+06	-2,38868E+04	1,83412E+02	-6,88302E-01	1,29539E-03	-9,80487E-07
	h _{vapor}	1,77694E+06	-2,85863E+04	2,19545E+02	-8,23902E-01	1,54913E-03	-1,17261E-06
	s _{vapor}	9,86280E+03	-1,30415E+02	8,67298E-01	-2,97614E-03	5,23527E-06	-3,75697E-09
	cv _{vapor}	-7,33042E+03	1,45762E+02	-1,09602E+00	4,14758E-03	-7,78369E-06	5,82287E-09
	cp _{vapor}	-2,23301E+05	4,23454E+03	-3,19058E+01	1,19720E-01	-2,23690E-04	1,66650E-07
	ss _{vapor}	6,24437E+02	-1,04297E+01	8,27473E-02	-3,14190E-04	5,92712E-07	-4,59571E-10
	μ _{JT, vapor}	8,49516E-03	-1,36069E-04	8,85981E-07	-2,90778E-09	4,79060E-12	-3,16113E-15
R22	p _{líquido}	-8,97205E+03	1,52395E+02	-9,99374E-01	3,22391E-03	-5,62289E-06	5,26502E-09
	p _{vapor}	-8,97205E+03	1,52395E+02	-9,99374E-01	3,22391E-03	-5,62289E-06	5,26502E-09
	ρ _{líquido}	1,61852E+04	-2,72497E+02	2,04852E+00	-7,74375E-03	1,45962E-05	-1,10156E-08
	ρ _{vapor}	-1,27277E+04	2,42224E+02	-1,83670E+00	6,94188E-03	-1,31019E-05	9,91945E-09
	u _{líquido}	-1,54512E+06	2,86226E+04	-2,08031E+02	7,81090E-01	-1,46217E-03	1,09753E-06
	h _{líquido}	-1,73241E+06	3,21853E+04	-2,35058E+02	8,83455E-01	-1,65635E-03	1,24601E-06
	s _{líquido}	-5,82322E+03	1,02931E+02	-7,02276E-01	2,54289E-03	-4,66413E-06	3,44945E-09
	cv _{líquido}	-4,77198E+03	1,07854E+02	-8,40741E-01	3,21627E-03	-6,05671E-06	4,52481E-09
	cp _{líquido}	-2,76494E+05	5,24967E+03	-3,95241E+01	1,48071E-01	-2,76088E-04	2,05119E-07
	ss _{líquido}	4,22663E+03	-5,00659E+01	3,59319E-01	-1,42256E-03	2,82214E-06	-2,24843E-09
	μ _{JT, líquido}	-4,26330E-04	8,08477E-06	-6,11319E-08	2,30199E-10	-4,31846E-13	3,23206E-16
	u _{vapor}	2,10695E+06	-3,44486E+04	2,63689E+02	-9,94467E-01	1,87368E-03	-1,41592E-06
	h _{vapor}	2,49926E+06	-4,18353E+04	3,20415E+02	-1,20809E+00	2,27429E-03	-1,71849E-06
	s _{vapor}	1,18335E+04	-1,64290E+02	1,12070E+00	-3,94337E-03	7,07216E-06	-5,14710E-09
	cv _{vapor}	-9,11689E+03	1,79226E+02	-1,35478E+00	5,12107E-03	-9,60732E-06	7,18786E-09
	cp _{vapor}	-4,18955E+05	7,91518E+03	-5,94662E+01	2,22364E-01	-4,13902E-04	3,07008E-07
	ss _{vapor}	5,26969E+02	-8,45010E+00	6,87694E-02	-2,63592E-04	4,98462E-07	-3,87560E-10
	μ _{JT, vapor}	2,54817E-03	-3,78170E-05	2,35185E-07	-7,51694E-10	1,22339E-12	-8,06109E-16

R32	Plíquido	-3,33150E+04	6,17188E+02	-4,53381E+00	1,66631E-02	-3,14715E-05	2,59227E-08
	p _{vapor}	-3,33150E+04	6,17188E+02	-4,53381E+00	1,66631E-02	-3,14715E-05	2,59227E-08
	ρ _{líquido}	5,37820E+04	-9,92772E+02	7,50890E+00	-2,83496E-02	5,33202E-05	-4,00220E-08
	ρ _{vapor}	-4,90302E+04	9,32546E+02	-7,06379E+00	2,66452E-02	-5,00831E-05	3,75767E-08
	u _{líquido}	-9,15682E+06	1,71376E+05	-1,28642E+03	4,85177E+00	-9,11749E-03	6,84055E-06
	h _{líquido}	-1,04025E+07	1,95078E+05	-1,46607E+03	5,53024E+00	-1,03954E-02	7,80296E-06
	s _{líquido}	-3,05672E+04	5,61151E+02	-4,13902E+00	1,54656E-02	-2,89110E-05	2,16088E-08
	CV _{líquido}	-8,58632E+04	1,65722E+03	-1,25767E+01	4,74498E-02	-8,90662E-05	6,66045E-08
	CP _{líquido}	-4,48473E+06	8,46013E+04	-6,34774E+02	2,36888E+00	-4,39733E-03	3,24885E-06
	SS _{líquido}	1,30403E+04	-2,15760E+02	1,62028E+00	-6,22722E-03	1,19778E-05	-9,25092E-09
	μ _{JT, líquido}	-1,76231E-03	3,34406E-05	-2,52685E-07	9,50351E-10	-1,77942E-12	1,32751E-15
	u _{vapor}	1,29649E+07	-2,39680E+05	1,82212E+03	-6,88393E+00	1,29582E-02	-9,73910E-06
	h _{vapor}	1,53918E+07	-2,85736E+05	2,17242E+03	-8,20487E+00	1,54382E-02	-1,16008E-05
	s _{vapor}	5,03634E+04	-8,69335E+02	6,38658E+00	-2,36613E-02	4,39591E-05	-3,27201E-08
	CV _{vapor}	-5,04222E+04	9,72776E+02	-7,43418E+00	2,83787E-02	-5,39438E-05	4,08844E-08
	CP _{vapor}	-7,68974E+06	1,45016E+05	-1,08806E+03	4,06056E+00	-7,53787E-03	5,56937E-06
	SS _{vapor}	4,21084E+03	-7,81256E+01	5,98880E-01	-2,26588E-03	4,25891E-06	-3,20480E-09
	μ _{JT, vapor}	8,31391E-03	-1,29283E-04	8,23647E-07	-2,66824E-09	4,37867E-12	-2,90481E-15
R404a	Plíquido	-2,36577E+04	4,41392E+02	-3,26202E+00	1,20385E-02	-2,27670E-05	1,87290E-08
	p _{vapor}	-2,65271E+04	4,96120E+02	-3,67868E+00	1,36246E-02	-2,57932E-05	2,10434E-08
	ρ _{líquido}	6,60450E+04	-1,23233E+03	9,39740E+00	-3,57833E-02	6,79224E-05	-5,14811E-08
	ρ _{vapor}	-6,56075E+04	1,25788E+03	-9,60795E+00	3,65568E-02	-6,93286E-05	5,24919E-08
	u _{líquido}	-5,61321E+06	1,06413E+05	-8,04540E+02	3,06292E+00	-5,80981E-03	4,40178E-06
	h _{líquido}	-6,40603E+06	1,21623E+05	-9,20810E+02	3,50591E+00	-6,65186E-03	5,04186E-06
	s _{líquido}	-1,92256E+04	3,57611E+02	-2,64907E+00	9,97899E-03	-1,88205E-05	1,42002E-08
	CV _{líquido}	-5,67916E+04	1,09657E+03	-8,33286E+00	3,15601E-02	-5,95277E-05	4,47571E-08
	CP _{líquido}	-2,95602E+06	5,62150E+04	-4,25352E+02	1,60140E+00	-3,00009E-03	2,23780E-06
	SS _{líquido}	2,13507E+04	-3,67733E+02	2,69343E+00	-9,99235E-03	1,85460E-05	-1,37875E-08
	μ _{JT, líquido}	-3,37455E-03	6,44406E-05	-4,90081E-07	1,85544E-09	-3,49755E-12	2,62690E-15
	u _{vapor}	8,61942E+06	-1,60721E+05	1,23062E+03	-4,68054E+00	8,87889E-03	-6,72654E-06
	h _{vapor}	1,01687E+07	-1,90380E+05	1,45803E+03	-5,54601E+00	1,05199E-02	-7,97090E-06
	s _{vapor}	3,33637E+04	-5,87283E+02	4,37472E+00	-1,63614E-02	3,06652E-05	-2,30206E-08
	CV _{vapor}	-5,17535E+04	9,95316E+02	-7,57053E+00	2,87454E-02	-5,43764E-05	4,10416E-08
	CP _{vapor}	-4,93054E+06	9,37362E+04	-7,09251E+02	2,67026E+00	-5,00257E-03	3,73144E-06
	SS _{vapor}	1,76078E+03	-3,26213E+01	2,56039E-01	-9,88324E-04	1,89996E-06	-1,47731E-09
	μ _{JT, vapor}	9,67987E-03	-1,63094E-04	1,11396E-06	-3,83258E-09	6,62292E-12	-4,58941E-15
R407c	Plíquido	-2,54505E+03	3,07189E+01	-8,19288E-02	-2,05399E-04	6,58775E-07	8,90252E-10
	p _{vapor}	-4,23626E+04	7,85536E+02	-5,79650E+00	2,14230E-02	-4,02994E-05	3,18798E-08
	ρ _{líquido}	4,33196E+04	-7,83033E+02	5,87083E+00	-2,19950E-02	4,10596E-05	-3,06067E-08
	ρ _{vapor}	-3,59926E+04	6,80350E+02	-5,12079E+00	1,91929E-02	-3,58541E-05	2,67557E-08
	u _{líquido}	-4,13828E+06	7,66076E+04	-5,66647E+02	2,12107E+00	-3,95522E-03	2,94700E-06
	h _{líquido}	-4,69857E+06	8,71988E+04	-6,46390E+02	2,42022E+00	-4,51521E-03	3,36661E-06
	s _{líquido}	-1,41763E+04	2,55042E+02	-1,82913E+00	6,73481E-03	-1,24451E-05	9,21279E-09
	CV _{líquido}	-4,21282E+04	8,09496E+02	-6,07713E+00	2,27038E-02	-4,21943E-05	3,12365E-08
	CP _{líquido}	-1,64608E+06	3,08580E+04	-2,29924E+02	8,51863E-01	-1,56955E-03	1,15081E-06
	SS _{líquido}	1,44400E+04	-2,35052E+02	1,69317E+00	-6,23262E-03	1,14893E-05	-8,49135E-09
	μ _{JT, líquido}	-1,66921E-03	3,14057E-05	-2,35203E-07	8,76371E-10	-1,62495E-12	1,19999E-15
	u _{vapor}	5,64731E+06	-1,01598E+05	7,68593E+02	-2,88136E+00	5,38586E-03	-4,02173E-06
	h _{vapor}	6,70934E+06	-1,21601E+05	9,19924E+02	-3,44797E+00	6,44230E-03	-4,81025E-06
	s _{vapor}	2,40700E+04	-3,92220E+02	2,81520E+00	-1,02257E-02	1,86965E-05	-1,37336E-08
	CV _{vapor}	-3,06529E+04	5,88627E+02	-4,44879E+00	1,67883E-02	-3,15082E-05	2,35586E-08
	CP _{vapor}	-1,65955E+06	3,11462E+04	-2,32487E+02	8,63100E-01	-1,59377E-03	1,17141E-06
	SS _{vapor}	1,82729E+03	-3,30933E+01	2,54263E-01	-9,58743E-04	1,79745E-06	-1,35880E-09
	μ _{JT, vapor}	5,72532E-03	-8,76176E-05	5,51305E-07	-1,76664E-09	2,86884E-12	-1,88188E-15

R410a	Plíquido	-2,67556E+04	4,98447E+02	-3,67972E+00	1,36022E-02	-2,59718E-05	2,19134E-08
	p _{vapor}	-3,39619E+04	6,36590E+02	-4,73440E+00	1,76106E-02	-3,35545E-05	2,76213E-08
	ρlíquido	7,93057E+04	-1,48483E+03	1,13164E+01	-4,30417E-02	8,15819E-05	-6,17178E-08
	ρ _{vapor}	-6,88599E+04	1,32156E+03	-1,01049E+01	3,84897E-02	-7,30767E-05	5,53918E-08
	ulíquido	-8,58234E+06	1,62351E+05	-1,22754E+03	4,66086E+00	-8,82014E-03	6,66535E-06
	hlíquido	-9,72159E+06	1,84211E+05	-1,39468E+03	5,29776E+00	-1,00308E-02	7,58543E-06
	slíquido	-2,92246E+04	5,44126E+02	-4,04981E+00	1,52447E-02	-2,87036E-05	2,16085E-08
	CVlíquido	-1,16296E+05	2,24931E+03	-1,71896E+01	6,53618E-02	-1,23693E-04	9,32660E-08
	CPlíquido	-4,96404E+06	9,44135E+04	-7,14527E+02	2,69049E+00	-5,04085E-03	3,76002E-06
	SSLíquido	1,83091E+04	-3,20628E+02	2,42512E+00	-9,29668E-03	1,78066E-05	-1,36565E-08
	μ _{JT, líquido}	-2,99754E-03	5,73018E-05	-4,36263E-07	1,65352E-09	-3,12050E-12	2,34646E-15
	u _{vapor}	1,17053E+07	-2,19298E+05	1,68291E+03	-6,42019E+00	1,22099E-02	-9,27193E-06
	h _{vapor}	1,38215E+07	-2,59867E+05	1,99440E+03	-7,60747E+00	1,44644E-02	-1,09836E-05
	S _{vapor}	4,46692E+04	-7,90666E+02	5,90502E+00	-2,21760E-02	4,17268E-05	-3,14394E-08
	CV _{vapor}	-8,34880E+04	1,60880E+03	-1,23108E+01	4,70187E-02	-8,94810E-05	6,79189E-08
R507a	CP _{vapor}	-7,79561E+06	1,48343E+05	-1,12358E+03	4,23462E+00	-7,94203E-03	5,93065E-06
	SS _{vapor}	4,08501E+03	-7,66658E+01	5,91127E-01	-2,25368E-03	4,27350E-06	-3,24762E-09
	μ _{JT, vapor}	8,45090E-03	-1,35776E-04	8,93091E-07	-2,98565E-09	5,05363E-12	-3,45545E-15
	Plíquido	-2,75132E+04	5,16178E+02	-3,83917E+00	1,42550E-02	-2,70131E-05	2,19967E-08
	p _{vapor}	-2,93806E+04	5,51980E+02	-4,11261E+00	1,52947E-02	-2,89806E-05	2,34779E-08
	ρlíquido	6,91691E+04	-1,29476E+03	9,89646E+00	-3,77712E-02	7,18670E-05	-5,46027E-08
	ρ _{vapor}	-6,94899E+04	1,33501E+03	-1,02185E+01	3,89640E-02	-7,40576E-05	5,61974E-08
	ulíquido	-5,69838E+06	1,08348E+05	-8,21431E+02	3,13512E+00	-5,96207E-03	4,52879E-06
	hlíquido	-6,50248E+06	1,23807E+05	-9,39878E+02	3,58746E+00	-6,82396E-03	5,18556E-06
	slíquido	-1,95430E+04	3,64823E+02	-2,71172E+00	1,02447E-02	-1,93759E-05	1,46596E-08
	CVlíquido	-6,01566E+04	1,16347E+03	-8,86488E+00	3,36686E-02	-6,36893E-05	4,80283E-08
	CPlíquido	-3,00019E+06	5,71849E+04	-4,33731E+02	1,63705E+00	-3,07492E-03	2,29986E-06
	SSLíquido	2,19598E+04	-3,80940E+02	2,80510E+00	-1,04591E-02	1,95117E-05	-1,45797E-08
	μ _{JT, líquido}	-3,51159E-03	6,72054E-05	-5,12284E-07	1,94414E-09	-3,67388E-12	2,76642E-15
	u _{vapor}	8,95715E+06	-1,67565E+05	1,28539E+03	-4,89877E+00	9,31195E-03	-7,06908E-06
R718	h _{vapor}	1,05923E+07	-1,98930E+05	1,52627E+03	-5,81732E+00	1,10571E-02	-8,39472E-06
	S _{vapor}	3,44993E+04	-6,11716E+02	4,57628E+00	-1,71780E-02	3,23005E-05	-2,43198E-08
	CV _{vapor}	-5,55327E+04	1,06940E+03	-8,14860E+00	3,09917E-02	-5,87282E-05	4,44069E-08
	CP _{vapor}	-5,25437E+06	1,00102E+05	-7,59074E+02	2,86436E+00	-5,37896E-03	4,02206E-06
	SS _{vapor}	2,10300E+03	-3,92657E+01	3,07308E-01	-1,18535E-03	2,27686E-06	-1,76471E-09
	μ _{JT, vapor}	9,75907E-03	-1,65300E-04	1,13443E-06	-3,92026E-09	6,80270E-12	-4,73290E-15
	Plíquido	-3,33096E+03	6,32063E+01	-4,83311E-01	1,86286E-03	-3,62194E-06	2,84411E-09
	p _{vapor}	-3,33096E+03	6,32063E+01	-4,83311E-01	1,86286E-03	-3,62194E-06	2,84411E-09
	ρlíquido	-6,41831E+03	1,07489E+02	-6,26522E-01	1,84235E-03	-2,73530E-06	1,63280E-09
	ρ _{vapor}	-6,57681E+00	1,43204E-01	-1,23566E-03	5,30481E-06	-1,13693E-08	9,75792E-12
	ulíquido	-4,25081E+06	5,14337E+04	-2,87491E+02	8,75692E-01	-1,33610E-03	8,17394E-07
	hlíquido	-4,25568E+06	5,15231E+04	-2,88155E+02	8,78177E-01	-1,34080E-03	8,20982E-07
	slíquido	-2,11747E+04	2,52600E+02	-1,34575E+00	3,90692E-03	-5,81263E-06	3,49833E-09
	CVlíquido	-3,67541E+04	6,05761E+02	-3,58335E+00	1,06936E-02	-1,62003E-05	9,94026E-09
	CPlíquido	2,11557E+05	-3,13688E+03	1,89984E+01	-5,75757E-02	8,72833E-05	-5,29291E-08
	SSLíquido	-2,60480E+04	3,52189E+02	-1,85487E+00	5,03700E-03	-7,01536E-06	3,97375E-09
	μ _{JT, líquido}	-1,23430E-05	1,76336E-07	-1,04095E-09	3,10362E-12	-4,65769E-15	2,81340E-18
R718	u _{vapor}	1,86274E+06	3,49180E+03	-1,29560E+01	3,80606E-02	-5,06133E-05	2,04686E-08
	h _{vapor}	1,83268E+06	4,42114E+03	-1,57296E+01	4,55308E-02	-5,84967E-05	2,09833E-08
	S _{vapor}	4,92651E+04	-4,19113E+02	1,86029E+00	-4,51432E-03	5,80343E-06	-3,11154E-09
	CV _{vapor}	2,21362E+04	-3,32330E+02	2,10645E+00	-6,60673E-03	1,02551E-05	-6,27967E-09
	CP _{vapor}	2,43037E+04	-3,58709E+02	2,26523E+00	-7,06660E-03	1,08787E-05	-6,57073E-09
	SS _{vapor}	-4,99795E+02	1,14691E+01	-6,54701E-02	2,00603E-04	-3,06764E-07	1,84264E-10
	μ _{JT, vapor}	2,69095E-01	-3,69235E-03	2,03979E-05	-5,66271E-08	7,89231E-11	-4,41474E-14