

ENFOQUE

UTE
REVISTA



Facultad Ciencias de la Ingeniería e Industrias
eISSN:13906542



Volumen 12 • N°1 • Enero 2021

Sumario

CARACTERIZACIÓN Y CALIDAD DE LOS COMPOST PRODUCIDOS Y COMERCIALIZADOS EN RUPA RUPA-HUÁNUCO (Characterization and quality of compost produced and marketed in Rupa Rupa-Huánuco) <i>Marlon Ricardo, Bailón-Rojas, Nelino, Florida-Rofner</i>	1
ANÁLISIS NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN LA SECCIÓN DE LA GARGANTA DE UNA TOBERA CÓNICA EXPERIMENTAL (Numerical analysis of the flow behavior in the throat section of an experimental conical nozzle) <i>San Luis B. Tolentino-Masgo, María Alejandra Parco, Simón Caraballo, Leonardo Lacruz, Vicente Marcano, John Ferreira, Jorge Mírez</i>	12
EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL GRADO DE MADUREZ DE LA GULUPA (PASSIFLORA EDULIS SIMS) SOBRE LA ACEPTACIÓN SENSORIAL EN PRODUCTOS ALIMENTICIOS (Evaluation of the influence of the degree of maturity of gulupa [Passiflora edulis Sims] on sensory acceptance in food products) <i>Laura Patricia Bermeo Escobar</i>	29
AUTOCONFIGURATION WITH GLOBAL ADDRESSES USING IEEE 802.15.4 STANDARD IN MULTI-HOP NETWORKS (Autoconfiguración con direcciones globales usando el estándar IEEE 802.15.4 en redes multisalto) <i>Carlos Egas Acosta, David Cali, Cristian Espinosa</i>	44
IMPACTOS AMBIENTALES EN LA TIRA LITORAL DE LA COSTA POR ACCIÓN ANTRÓPICA EN LA CIUDAD DE TRUJILLO, PERÚ (Environmental Impacts on the Littoral Coastal Strip by Anthropoc Action in the City of Trujillo, Perú) <i>Carlos A. Bocanegra García, Bilmia Veneros Urbina, Zoila Culquichicón Malpica</i>	59
BIOMASS POTENTIAL AND KINETICS OF DRYING MODEL OF PIPTOCOMA DISCOLOR (PIGÜE) AS A SOURCE OF RENEWABLE ENERGY SOURCE IN ECUADOR (Potencial de la biomasa y la cinética del modelo de secado de Piptocoma discolor (pigüe) como fuente de energía renovable en el Ecuador) <i>Juan Elías González, Billy Coronel Espinoza, Viviana Quevedo Tumailli, Hernán Uvidía Cabadiana, Deny Oliva M., Carlos Jesús Morón, Morillo Robles Campo</i>	74

Caracterización y calidad de los compost producidos y comercializados en Rupa Rupa-Huánuco

(Characterization and quality of compost produced and marketed in Rupa Rupa-Huánuco)

Marlon Ricardo, Bailón-Rojas¹, Nelino, Florida-Rofner²

Resumen

El cacao y el café son cultivos importantes en la zona que se manejan bajo normas de producción orgánica, y el uso de abonos orgánicos es alto, en especial del compost. Por ello, se evaluaron los indicadores fisicoquímicos y se determinó la calidad de los compost producidos con diferentes insumos y comercializados en el distrito Rupa Rupa, región Huánuco-Perú. Es una investigación no experimental correlacional con ajuste estadístico completamente aleatorizado; los tratamientos lo constituyen los siguientes compost identificados: compost Alborada (CAL), compost M&F Orgánicos (CMF), compost de residuos municipal (CML), compost de la cooperativa Divisoria (CCD) y compost comercial formulado (CCF). Se evaluaron indicadores físicos (humedad) y químicos (cenizas, pH, MO, N, P₂O₅, K, Ca, Mg, Na, Cu, Fe, Mn y Zn) y se determinó la calidad según la norma técnica colombiana (NTC 5167), la Norma Oficial Chilena (NOCh 2880) y los estándares de calidad de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Los resultados no muestran diferencias en los indicadores fisicoquímicos, excepto los niveles de N y, según la NTC y la OMS, corresponden a compost de buena calidad, mientras la NOCh los clasifica como compost de calidad media. En conclusión, los compost evaluados son de calidad media y la norma que mejor determina la calidad es la NOCh, que puede ser aplicada en países que no disponen de una norma específica que determine la calidad del compost.

Palabras clave

Compost formulado, compost estable, estándares de calidad, indicadores de calidad, normas técnicas, residuo municipal.

Abstract

Cocoa and coffee are important crops in the area and are managed under organic production standards, and the use of organic fertilizers is high, especially compost. For this reason, physical-chemical indicators were evaluated, and the quality of the compost produced with different inputs and marketed in the Rupa Rupa district, Huánuco-Peru region, was determined. It is a non-experimental correlational investigation with statistical adjustment of completely randomized, the treatments are the identified compost: Alborada compost (CAL), M&F Organic compost (CMF), municipal waste compost (CML), compost from the Divisoria Cooperative (CCD) and formulated commercial compost (CCF). Physical (humidity) and chemical indicators (ashes, pH, MO, N, P₂O₅, K, Ca, Mg, Na, Cu, Fe, Mn and Zn) were evaluated and the quality was determined according to the Colombian technical standard (NTC 5167), the Chilean official standard (NOCh 2880) and the quality standards of the World Health Organization (OMS). The Results show no differences in the physical and chemical indicators, except for the N levels and according to the NTC and the OMS correspond to good quality compost and the NOCh classifies them as medium quality compost. In conclusion, the compost evaluated are of medium quality and the standard that best determines the quality is the NOCh, which can be applied in countries that do not have a specific standard that determines the quality of the compost.

Keywords

Formulated compost, stable compost, quality standards, technical norms, municipal waste

1 Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María Huánuco-Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9907-5210>, e-mail: bailon84@hotmail.com
2 Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María Huánuco-Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8751-4367>, e-mail: nelinof@hotmail.com

Introducción

Los cultivos de importancia económica en el distrito Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, son el café y el cacao. Al respecto, el Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI, 2019a) informa que Perú es el segundo exportador mundial de café orgánico, que es el primer producto agrícola peruano de exportación, y el séptimo país exportador de café a nivel mundial y posee 425 416 hectáreas, que representan 6 % del área agrícola nacional; mientras que Huánuco es el séptimo productor a nivel nacional. Además, el segundo cultivo más importante en la provincia es el de cacao que a nivel nacional, en 2018, alcanzó una extensión de 199 mil hectáreas. Huánuco ocupa el quinto lugar en extensión de este cultivo (MINAGRI, enero 2019b), del cual el 75 % es calificado cacao fino o de aroma, por lo que, en 2015, ocupó el tercer lugar como país productor de cacao fino o de aroma en el mundo (MINAGRI, 2016), y, en 2018, se posicionó como segundo productor de cacao orgánico a nivel mundial (MINAGRI, 2019c).

El cacao y el café son los cultivos más importantes en el área de influencia de esta investigación y se manejan bajo las normas de una producción orgánica, impulsada por diferentes instituciones públicas, privadas y por asociaciones de productores; además, el uso de abonos orgánicos en el proceso de producción es alto, en especial del compost. La calidad de estos productos orgánicos es relevante, por ello, la evaluación de sus principales indicadores físico-químicos como humedad, olor, color pH, MO, N, P y bases como Ca, K y Mg permiten medir la calidad (Hernández, 2020; Rivas & Silva, 2020; Florida & Reategui, 2019; Rafael, 2015; García et al., 2014; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO, por sus siglas en inglés] 2013; Mendoza, 2012) y la madurez de un material compostado (Muscolo et al., 2018). El conocimiento de la calidad, expresado en los indicadores físico-químicos, es fundamental, independientemente de la madurez, para mantener la sostenibilidad económica y ambiental en todo proceso productivo.

El compostaje es una técnica que permite la biodegradación controlada de residuos y subproductos orgánicos (Rivas & Silva, 2020; López et al., 2017), transformándolos en materiales biológicamente estables cuyo producto final es el compost, fertilizante de liberación lenta con efectos residuales positivos (Peralta et al., 2019; Sharma et al., 2017) usado como sustrato (Bárbaro et al., 2019) y con capacidad de mejorar las condiciones edáficas y la producción del cultivo (Cabrera & Rossi, 2016). Como materia orgánica estabilizada, se puede usar para recuperar suelos degradados, restaurar la fertilidad reduciendo el uso de insumos químicos tradicionales (Rivas & Silva, 2020; Alvarez et al., 2019) y disminuir la disposición de residuos en vertederos (Florida & Reategui, 2019; Muscolo et al., 2018).

El compost sin un control de calidad de la autoridad competente puede generar efectos perjudiciales a los agroecosistemas y a la economía de los productores, por la baja capacidad fertilizante o por la presencia de sustancias fitotóxicas en elevadas concentraciones. Por tanto, su utilización es altamente riesgosa en los cultivos (García et al., 2014); frente a ello, Ramos & Terry (2014) sugieren cumplir con determinadas normas de calidad fijada por cada país, rangos que el material compostado debe cumplir (Rafael, 2015). Sin embargo, Perú carece de una norma técnica específica para definir la calidad del compost y recurre a las principales normas de países vecinos como la norma técnica colombiana NTC 5167 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2011) y la Norma Oficial Chilena NOCh 2880 (Instituto Nacional de Normalización, 2004) y, complementariamente, a los estándares de la OMS y la FAO. En este contexto, la investigación planteó como objetivo evaluar los indicadores físico-químicos y determi-

nar la calidad, con base en la NOCh 2880, NTC 5167 y los estándares de la OMS, de los compost que se producen y comercializan en el distrito Rupa Rupa, región Huánuco, Perú.

Metodología

Área de estudio

El lugar donde se desarrolló la investigación está en la jurisdicción de la ciudad de Tingo María, que pertenece políticamente al distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, región Huánuco-Perú. Las condiciones climáticas generales que presenta, según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (2020), son las siguientes: temperatura media anual de 24.5 C, humedad relativa media anual de 84 % y precipitación media anual de 3400 mm. Según Pulgar (2014), el área pertenece a la ecorregión Rupa Rupa o selva alta.

Sobre los tipos de abonos

La investigación identificó las empresas, asociaciones y dueños de fincas que producen abonos orgánicos en la ciudad de Tingo María, Castillo Grande y Naranjillo, así como aquellos que ofrecen comercialmente (compost formulados). Se hizo una descripción de los insumos básicos de su preparación y se analizó por cuadruplicado (4 muestras) de cada uno de los abonos identificados y seleccionados, entre ellos:

- a. Abono orgánico tipo compost: producido por la Cooperativa Agraria Cafetalera Divisoria (CCD). La empresa no aceptó develar los insumos que utiliza en su producción, sin embargo, el producto presenta su ficha técnica (Tabla 1) que describe su composición.

Tabla 1. Ficha técnica, compost de la Cooperativa Cafetalera Divisoria (CCD)

Indicador	Unidad	Contenido medio
Humedad	%	18
MO	%	40
N	%	1.2±0.5
P2O5	%	1.5±0.5
Ca	%	9.5±0.5
MgO	%	5.5±0.5
K2O	%	1.5±0.5
Na	%	0.5
Cu	ppm	42
Fe	ppm	3029
Zn	ppm	780
Mn	ppm	1647

- b. Compost producidos por la empresa M&F Orgánicos (CMF): la Tabla 2 describe su composición media; según el productor, el compost que produce es 100 % a base de estiércol de vacuno y mediado por microorganismos eficientes.

Tabla 2. Ficha técnica del compost producido por la empresa M&F Orgánicos (CMF)

Indicador	Unidad	Contenido medio
Humedad	%	20
Cenizas	%	--
pH		7.82
MO	%	39
N	%	1.7
P2O5	%	1
Ca	%	1.9
MgO	%	1.4
K2O	%	1.1
Na	%	0.6
Cu	ppm	42
Fe	ppm	3500
Zn	ppm	70
Mn	ppm	230

-- Valor no especificado

- c. Compost producido por la empresa Alborada S. A. (CAL): el compost es producido para satisfacer el requerimiento de una finca independiente, el fundo Alborada, de 7 ha de cacao en producción y manejo del suelo con base en compost. No presenta una ficha técnica, sin embargo, mantiene un registro de los insumos usados en el compostaje: estiércol de cuy, estiércol de murciélago, restos de mazorcas de cacao, residuos vegetales frescos (tallo de plátano, hojas de kudzu y/o eritrina), mucilago de cacao y leche fresca.
- d. Compost de residuos sólidos orgánicos: producidos por la municipalidad provincial de Leoncio Prado (CML). Este compost se produce con los residuos que la municipalidad recolecta a través del programa de segregación en la fuente, por medio de un recolector especialmente destinado a este fin. Los residuos son tratados mediante el compostaje en pilas aeróbicas y con aplicación de microorganismos eficientes, para mejorar el proceso y la calidad del producto.

Caracterización fisicoquímica

De cada compost identificado se extrajeron 4 muestras al azar y se realizó el análisis fisicoquímico correspondiente en el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Se determinó el % de humedad por método gravimétrico, el % de cenizas por calcinación, pH por método electrométrico, MO Walkley y Black, N micro Kjeldahl, P Olsen modificado, Ca, Mg, K y Na por acetato de amonio, y lectura en espectro fotómetro de absorción atómica; todos los análisis se realizaron siguiendo los protocolos descritos por Bazán (2017).

Análisis estadístico

Es una investigación no experimental correlacional con ajuste estadístico completamente aleatorizado; los tratamientos lo constituyen los siguientes compost identificados: CAL, CMF, CML, CCD y CCF, y con tamaño de muestra $n=4$ (muestras por tipo de abono). Los datos se sometieron al análisis de varianza y la prueba post-hoc de Duncan con un nivel de significancia del 5 % para comparar las medias de indicadores físicos y químicos entre los abonos. Para el procesamiento de los datos, se utilizó el software libre IBM-SPSS 25.

Resultados

Caracterización físico-química

Se evaluaron los principales indicadores fisicoquímicos (Tabla 3) que son considerados y exigidos por la NTC, la NOCh y la OMS. Además, son indicadores que definen la calidad de los abonos orgánicos tipo compost, señalados por diferentes autores.

Tabla 3. Estadística de indicadores fisicoquímicos en materia seca

Indicador	CAL	CML	CCD	CMF	CCF	F	Sig
Humedad	34.8±17.2a	32.28±19.24a	33.55±16.9a	28.2±16.56a	27.28±17.5a	306.39	0.96
Ceniza	66.5±10.8a	63.17±8.84a	63.55±10.6a	67.4±12.2a	68.15±12.8a	123.44	0.95
pH	8.1±1.1a	8.13±1.27a	7.68±0.97a	8.33±0.76a	7.9±1.3a	0.21	0.93
MO, %	33.5±10.8a	36.84±8.84a	36.45±10.6a	32.62±12.2a	29.35±9.3a	107.99	0.84
N	1.65±0.2a	1.43±0.16a	1.44±0.16a	1.64±0.08a	2.48±0.35b	18.03	<0.001
P2O5, %	1.58±0.5a	1.57±0.44a	1.35±0.82a	1.2±0.28a	1.76±0.5a	0.29	0.64
Ca, %	1.18±0.4a	2.21±0.76a	1.98±1.05a	2.53±0.71a	2.67±0.9a	0.64	0.126
Mg, %	1.13±0.8a	1.17±0.36a	1.49±0.37a	1.48±0.47a	1.36±0.38a	0.19	0.67
K, %	4±2a	4.47±2.88a	4.45±2.82a	3.01±0.89a	3.55±1.89a	0.32	0.86
Na, %	0.56±0.5a	0.65±0.49a	1.11±0.53a	0.93±0.84a	1.04±0.5a	0.34	0.611
Cu, ppm	46.3±32.6a	38.5±31.42a	57.75±45.67a	41±37.9a	48.8±36.99a	1387	0.954
Fe, ppm	5218±1071	4421±2011	2992±2162a	4233±2765a	5138±1206a	379408	0.515
Zn, ppm	802±464	727±440	845±311a	621.5±276a	765±385a	146398	0.935
Mn, ppm	576±329	474±272	648±286a	399.5±211a	507±323a	82737	0.779

Nota: CAL compost alborada, CML compost de la municipalidad de Leoncio Prado, CCD compost Cooperativa Divisoria, CMF compost de M&F orgánicos, CCF compost comercial formulado, F valor de distribución, Sig significativo, valores promedios en la misma columna seguidos de letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos.

Calidad de los compost evaluados

SEGÚN LA NORMA TÉCNICA COLOMBIANA (NTC)

La Tabla 4 muestra los niveles de indicadores fisicoquímicos encontrados y el control respectivo con la NTC, en ella se aprecia que el % de cenizas en los diferentes casos es el único indicador que supera el nivel máximo fijado por la NTC (máximo 60 %). Este indicador no tiene influencia sobre las funciones del compost como sustrato o enmienda, y no compromete la calidad del

producto; por lo que, según esta norma, todos los compost evaluados presentan buena calidad, porque poseen valores adecuados de pH, MO, N, P, K, Ca y Mg.

Tabla 4. Calidad del compost según la NTC 5167/2011

Calidad según NTC											
Indicador	NTC	CAL	Nivel	CML	Nivel	CCD	Nivel	CMF	Nivel	CCF	Nivel
Humedad	20-35 %	34.78	*	32.28	*	33.55	*	28.19	*	27.28	*
Cenizas	Max. 60 %	66.49	**	63.17	**	63.55	**	67.38	**	68.15	**
pH	4-9	8.1	*	8.13	*	7.68	*	8.33	*	7.9	*
MO	Min. 15 %	33.52	*	36.84	*	36.45	*	32.62	*	29.35	*
N	> 1 %	1.65	*	1.43	*	1.44	*	1.64	*	2.48	*
P205	> 1 %	1.58	*	1.57	*	1.35	*	1.2	*	1.76	*
Ca	> 1 %	1.18	*	2.21	*	1.98	*	2.53	*	2.67	*
Mg	> 1 %	1.13	*	1.17	*	1.49	*	1.48	*	1.36	*
K	> 1 %	4	*	4.47	*	4.45	*	3.01	*	3.55	*
Na	--	0.56	--	0.65	--	1.11	--	0.93	--	1.04	--
Cu	--	46.25	--	38.5	--	57.75	--	41	--	48.75	--
Fe	--	5217.5	--	4420.75	--	2991.5	--	4233	--	5137.5	--
Zn	--	801.5	--	726.5	--	845	--	621.5	--	764.5	--
Mn	--	575.5	--	474.25	--	648	--	399.5	--	506.75	--
Calidad del compost		Buena (*)		Buena (*)		Buena (*)		Buena (*)		Buena (*)	

Nota: CAL compost alborada, CML compost de la municipalidad de Leoncio Prado, CCD compost Cooperativa Divisoria, CMF compost de M&F orgánicos, CCF compost comercial formulado, -- valor no especificado, * valor dentro del límite fijado por NTC, ** valor que excede al límite fijado por NTC.

La Tabla 5 muestra los niveles de indicadores físico-químicos encontrados y el control respectivo con la NOCh 2880, en ella se aprecia que los % de humedad, pH, MO y Zn cumplen con los niveles exigidos para un compost de clase B, y los indicadores P, K, Ca, Mg Na y Cu, los cumplen para un compost de clase A. Sin embargo, considerando que el % de humedad compromete el peso del producto, y el pH y la MO son indicadores fundamentales que definen la reactividad y una serie de procesos químicos ligados a los grupos funcionales de la MO, definiendo en gran medida la calidad del compost, por tanto se clasifican en la clase B según la NOCh 2880.

Tabla 5. Calidad del compost según la NOCh 2880

Indicador	NOCh											
	Clase A	Clase B	CAL	Clase	CML	Clase	CCD	Clase	CMF	Clase	CCF	Clase
Humedad	<25	25-40 %	34.78	B	32.28	B	33.55	B	28.19	B	27.3	B
Ceniza			66.49	--	63.17	--	63.55	--	67.38	--	68.2	--
pH	5-7.5	<5 y >7.5	8.1	B	8.13	B	7.68	B	8.33	B	7.9	B
MO	> 45 %	25-45 %	33.52	B	36.84	B	36.45	B	32.62	B	29.4	B
N	> 0.8 %		1.65	A	1.43	A	1.44	A	1.64	A	2.48	A

P205	< 5 %		1.58	A	1.57	A	1.35	A	1.2	A	1.76	A
Ca	> 1 %		1.18	A	2.21	A	1.98	A	2.53	A	2.67	A
Mg	> 1 %		1.13	A	1.17	A	1.49	A	1.48	A	1.36	A
K	> 1 %		4	A	4.47	A	4.45	A	3.01	A	3.55	A
Na	< 1 %		0.56	A	0.65	A	1.11	B	0.93	A	1.04	B
Cu	Max. 100		46	A	39	A	58	A	41	A	49	A
Fe	--		5218	--	4421	--	2992	--	4233	--	5138	--
Zn	Max. 200		802	B	727	B	845	B	622	B	765	B
Mn	--		576	--	474	--	648	--	400	--	507	--
Calidad del compost			Clase B		Clase B		Clase B		Clase B		Clase B	

Nota: CAL compost alborada, CML compost de la municipalidad de Leoncio Prado, CCD compost Cooperativa Divisoria, CMF compost de M&F orgánicos, CCF compost comercial formulado, -- valor no especificado, A y B compost de alta calidad y calidad media según la NOCh.

La Tabla 6 muestra que los diferentes compost evaluados presentan medias que, según la OMS, son de buena calidad.

Tabla 6. Calidad del compost según OMS

Calidad según NTC											
Indicador	OMS	CAL	Nivel	CML	Nivel	CCD	Nivel	CMF	Nivel	CCF	Nivel
Humedad	30 % - 50 %	34.78	*	32.28	*	33.55	*	28.19	*	27.28	*
pH	6-9	8.1	*	8.13	*	7.68	*	8.33	*	7.9	*
MO	25-50 %	33.52	*	36.84	*	36.45	*	32.62	*	29.35	*
N	0.4 % - 3.5 %	1.65	*	1.43	*	1.44	*	1.64	*	2.48	*
P ₂ O ₅	0.3 % - 1.8 %	1.58	*	1.57	*	1.35	*	1.2	*	1.76	*
Ca	--	1.18	--	2.21	--	1.98	--	2.53	--	2.67	--
Mg	--	1.13	--	1.17	--	1.49	--	1.48	--	1.36	--
K	--	4	--	4.47	--	4.45	--	3.01	--	3.55	--
Na	--	0.56	--	0.65	--	1.11	--	0.93	--	1.04	--
Calidad del compost		Buena (*)		Buena (*)		Buena (*)		Buena (*)		Buena (*)	

Nota: CAL compost alborada, CML compost de la municipalidad de Leoncio Prado, CCD compost Cooperativa Divisoria, CMF compost de M&F Orgánicos, CCF compost comercial formulado, -- valor no especificado, * nivel dentro de los límites fijados por la OMS.

Discusión

Indicadores fisicoquímicos

Los resultados (Tabla 3) muestran valores de humedad entre 27.28 (CCF) y 34.8 % (CAL). Este parámetro es importante porque un exceso de humedad afectaría el cálculo y la cantidad aplicada al suelo; por ello, la FAO (2013) y la NOCh recomiendan que no debe superar el 40 %; la NTC recomienda un rango de 20 a 35 %, y la OMS, hasta 50 %. Los valores encontrados están dentro de estos rangos y no se observan diferencias estadísticas entre los compost evaluados.

El pH (Tabla 3) varía de 7.68 (CCD) a 8.33 (CMF); este indicador es fundamental para determinar la calidad de un compost, la cual está influenciada por la composición de los resi-

duos utilizados en el proceso de compostaje (Florida & Reategui, 2019; FAO, 2013) que tiende a incrementarse con el tiempo de compostaje (Bárbaro et al., 2019), y se recomiendan valores que fluctúen en la neutralidad (Rivas & Silva, 2020). Los resultados coinciden con Rivas & Silva (2020), quienes encontraron valores entre 6.6 a 7.3 con residuos de jardinería, pergamino de café y bora; también Florida & Reategui (2019), en compost de plumas y estiércol de vacuno registra medias de 7.79 a 8.32; Bárbaro et al. (2019) reportan valores entre 4.7 a 8.7 en 15 compost de diferentes orígenes; Hernández et al. (2013), utilizando mezclas de estiércol de ganado vacuno lechero, estiércol de gallina, aserrín y esquilmos de maíz, encontraron medias entre 7.8 a 8.1 de pH; Widman et al. (2005) reportan una media de 7.35 de pH en compost producido a partir de residuos sólidos urbanos; Olivares et al. (2012) señalan medias de 6 a 7.42 de pH en lombricomposta y compost de estiércol de ganado vacuno lechero. Además, están dentro de los rangos establecidos por la NTC (4-9), la NOCh (pH >7.5), la OMS (6-9) y la FAO (2013) que fija un rango de 6.5 a 8.5 de pH y no presentan diferencias estadísticas entre los compost evaluados.

La MO presentó medias de 29.35 (CCF) a 36.84 % (CML). No se encontraron diferencias estadísticas para este indicador (Tabla 3) y el resultado cumple con los rangos establecidos por la NTC (mínimo 15 %), la NOCh (25-45 %), la OMS (25 a 50 %) y la FAO (2013) que exige valores mayores a 20 %. Además, coincide con los resultados de Olivares (2012), quien reporta medias de 25.7 a 32.01 %; Widman *et al.* (2005) reportan una media de 38.46 %; Hernández et al. (2013) de 18.79 a 30.68 % de MO; Vázquez & Loli (2018) reportan una media para vermicompost y compost de 37.75 y 40.73 respectivamente; Mendoza (2012) medias entre 32 y 38 % de MO en compost de residuos vegetales. Sin embargo, son inferiores a lo reportado por Rafael (2015) de 39 a 59.8 %; Florida & Reategui (2019) 39.6 a 51.14 % de MO, en combinación de estiércol de vacuno y plumas de pollo, y Florida et al. (2016) medias entre 61.3 a 92.27 % de MO, en compost con diferentes insumos, cáscara de plátano, pulpa de café y escobajo de palma.

El N presenta medias entre 1.43 (CML) a 2.48 % (CCF), encontrándose diferencias estadísticas entre los compost evaluados (Tabla 3) y son valores normales, excepto el CCF que presenta un valor superior al resto con 2.48 %; este último es superior a lo reportado por Mendoza (2012), con medias entre 1.05 y 1.33 % de N en compost de residuos vegetales, y por Soriano (2016), quien reporta medias entre 1.27 a 1.54 % N. Además, los resultados son inferiores a lo encontrado por Rafael (2015), medias de 1.79 a 3.02 % de N, y de Florida & Reategui (2019), medias de 2.4 a 4.8 % de N. Respecto a los 2.48 % de N en el compost CCF, es un valor alto para este compost; teniendo en cuenta que es el que presentó menor % de MO (29.35 %), se presume una posible alteración con alguna fuente química nitrogenada. Sin embargo, los valores se encuentran dentro de los rangos establecidos por la OMS 0.4 - 3.5 %; la NOCh, > 0.8 %, y la NTC que exige mayor a 1 % de N.

Los macroelementos P2O5 (1.2 a 1.76 %), Ca (1.18 a 2.67 %), Mg (1.13 a 1.49 %), K (4 a 4.47 %) y Na, con medias entre 0.56 a 1.11 %, no muestran diferencias estadísticas en estos indicadores entre los diferentes compost evaluados (Tabla 3). Los resultados son similares a los reportados por Alvarez et al., 2019, Florida & Reategui (2019), Vázquez & Loli (2018), López et al. (2017), Soriano (2016), Florida et al., (2016); Rafael (2015), Hernández et al. (2013) y Olivares (2012), y están dentro de los parámetros exigidos por la NTC y la NOCh, que exigen para estos indicadores valores mayores a 1 %.

Los metales pesados no mostraron diferencias significativas y se encontraron medias de 38.5 (CML) a 57.75 ppm de Cu (CCD), 2992 (CCD) a 5218 ppm de Fe (CAL), 621.5 (CMF) a 802 ppm de Zn (CAL) y 399.5 (CMF) a 648 ppm de Mn en el compost CCD. Los resultados son similares a

lo reportado por Rafael (2015) en todos los indicadores; en el caso de Fe y Cu son similares a lo encontrado por Florida & Reategui (2019) medias entre 3738 a 5290 ppm de Fe y 42 a 49 ppm de Cu, excepto Zn y Mn son medias más bajas; también Hernández et.al., (2013) muestran valores similares en Cu (48 a 93 ppm), pero menores en Zn, Mn y Fe que nuestros resultados. Sin embargo, Alvarez et al. (2019) y Olivares (2012) encontraron medias menores en todos los metales evaluados. De acuerdo con la NTC, no se puede hacer el control de calidad, ya que no precisa los rangos límites y la NOCh exige rangos de Cu (max 100) y Zn (max 200); en este caso se cumple con los niveles de Cu, mas no con los niveles de Zn. Sin embargo, los valores encontrados, según los autores citados, son medias aceptables que no comprometen negativamente la calidad del compost.

Calidad del compost según las normas

Se evaluó como indicador físico la humedad y químicos tales como cenizas, pH, MO, los macronutrientes P_2O_5 , K, Ca, Mg y Na y los microelementos o metales pesados Cu, Fe, Mn y Zn. Estos son indicadores que nos permiten determinar la calidad y han sido utilizados por diferentes autores (Hernández, 2020; Rivas & Silva, 2020; Florida & Reategui, 2019; Muscolo et al., 2018; Cabrera & Rossi, 2016; Florida et al., 2016; Rafael, 2015; García et al. 2014; FAO, 2013; Mendoza, 2012; Olivares, 2012).

Los resultados (Tabla 4 y 6) muestran que todos los indicadores evaluados cumplen con los rangos establecidos por la NTC y la OMS, excepto el % de cenizas para la NTC; al respecto, los valores altos en cenizas manifiestan la presencia de material mineral en el producto, no obstante, ninguno de los autores citados considera que esto comprometa la calidad del compost, por lo que los resultados, según la NTC 5167 y la OMS, corresponden a compost de buena calidad. Sin embargo, para la NOCh 2880, los resultados (Tabla 5) muestran que el % de humedad, el pH, MO y los niveles de Zn corresponden a compost de clase B. Considerando al pH y la MO como indicadores fundamentales que definen la reactividad y una serie de procesos químicos que definen en gran medida la calidad del compost (Florida & Reategui, 2019; Cabrera & Rossi, 2016; Rafael, 2015; García et al. 2014; FAO, 2013), para la NOCh 2880 todos los compost evaluados y que se comercializan en el distrito Rupa Rupa son de clase B, compost de calidad media, y que presenta ciertas restricciones para su uso.

Conclusión

Se identificó a cinco productos tipo compost que son comercializados en el distrito. Los indicadores fisicoquímicos no presentan diferencias estadísticas entre los compost evaluados, excepto para los niveles de Nitrógeno. Los valores medios de los diferentes indicadores se encuentran dentro de los rangos establecidos por la NTC, la NOCh, la OMS y la FAO, y son valores que coinciden con las referencias citadas.

Los resultados, según la NTC 5167 y la OMS, corresponden a compost de buena calidad y, según la NOCh 2880, se clasifica a todos los compost evaluados como compost de calidad media y que presenta restricciones para su uso.

La norma con mayor exigencia y jerarquización, en los diferentes indicadores fisicoquímicos, que mejor determina la calidad del compost es la NOCh 2880, que puede ser aplicada en países que aún no disponen de una norma específica.

Referencias

- Alvarez, V. M. Largo, A., Iglesias, A. S., & Castillo J. (2019). *Calidad de compost obtenido a partir de estiércol de gallina, con aplicación de microorganismos benéficos*. *Scientia Agropecuaria*, 10(3), 353-361. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.03.05>
- Bárbaro, L., Karlanian, M., Rizzo, P., & Riera, N. (2019). Caracterización de diferentes compost para su uso como componente de sustratos. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 35(2), 126-136. <https://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902019005000309>
- Bazán, R. (2017). *Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego*. Ministerio de Agricultura y Riego, Instituto Nacional de Innovación Agraria. Instituto Nacional de Innovación Agraria, pp. 92 <https://bit.ly/34UirXL>
- Cabrera, V., & Rossi, M. (2016). *Propuesta para la elaboración de compost a partir de los residuos vegetales provenientes del mantenimiento de las áreas verdes públicas del distrito de Miraflores*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria la Molina]. Repositorio UNALM. <https://bit.ly/30Zt3KC>
- Florida, N., & Reategui, F. (2019). Compost a base de plumas de pollos (*Gallus domesticus*). *Livestock Research for Rural Development*, 31(11), s. p. <https://bit.ly/3nJQt08>
- Florida, N., Reategui, F., & Pocomucha, V. (2016). Caracterización del compost a base de plumas de pollos (*Gallus domesticus*) y otros insumos. *Investigación y Amazonía*. 6(2), 1-5. <https://bit.ly/340iQS5>
- García, D., Lima, L., Ruíz, L., & Calderón, P. (2014). Métodos y parámetros para determinar la madurez en el compost a nivel de Fincas. *Medio Ambiente y Desarrollo*, 14(26), s. p. <https://bit.ly/3nHELg4>
- Hernández, M. (2020). *Aspectos físico-químicos, bioquímicos y microbiológicos del proceso de compostaje. Evaluación de la calidad*. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca. <https://bit.ly/36YjrU3>
- Hernández, R. O., Hernández, T. A., Rivera, F. C., Arras, V. A., & Ojeda B. D. (2013). Calidad nutrimental de cuatro abonos orgánicos producidos a partir de residuos vegetales y pecuarios. *Terra Latinoamericana*, 31(1), 35-46. <https://bit.ly/3nLDDP5>
- López, B., Andrade, R., Herrera, S. M., González, C. O., & García de la F. C. (2017). Propiedades de un compost obtenido a partir de residuos de la producción de azúcar de caña. *Revista Centro Agrícola*, 44(3), 49-55. <https://bit.ly/33PzFg8>
- Mendoza, M. (2012). *Propuesta de compostaje de los residuos vegetales generados en la Universidad de Piura*. [Tesis de pregrado, Universidad de Piura]. Repositorio PIRHUA. <https://handle.net/11042/1728>
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2019a). *Situación actual del café en el país*. <https://bit.ly/2Flz24y>
- Ministerio de Agricultura y Riego, (Enero 2019b). *Observatorio de Commodities: Cacao*. Boletín de publicación trimestral. Dirección General de Políticas Agrarias, Dirección de Estudios Económicos e Información Agraria. <https://bit.ly/36UWbGx>
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2019c). *Comportamiento del mercado nacional e internacional de las commodities*. Dirección General de Políticas Agrarias, Dirección de Estudios Económicos e Información Agraria. <https://bit.ly/34R0qP2>
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2016). *Estudio del cacao en el Perú y en el mundo: Situación actual y perspectivas en el mercado nacional e internacional al 2015*. MINAGRI-DGPA-DEEIA. <https://bit.ly/34Lgqnm>
- Musco A., Papalia T., Settineri G., Mallamaci C., & Kaczanowska A. (2018). Are Raw Materials or Composting Conditions and Time That Most Influence the Maturity and/or Quality of Composts? Comparison of Obtained Composts on Soil Properties. *Journal of Cleaner Production*, 195, 93-101. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.204>
- Instituto Nacional de Normalización. (2004). *Norma Chilena de Calidad de Compost (Norma Chilena Oficial 2880)*. <https://bit.ly/34PjmPU>

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2011). *Productos para la industria agrícola: Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo* (Norma Técnica Colombiana 5167). Segunda actualización . p.10. <https://bit.ly/36YoML5>
- Olivares, C., Hernández, R. A., Vences, C. C., Jáquez, B., & Ojeda, B. D. (2012). Lombricomposta y composta de estiércol de ganado vacuno lechero como fertilizantes y mejoradores de suelo. *Trópico Húmedo*, 28(1): 27-37. <https://bit.ly/30ZX9xi>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2013). *Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina Oficina Regional para América Latina y el Caribe Santiago de Chile*. <https://bit.ly/3dijhr0>
- Peralta, A. N., Freitas, G. B., Watthier, M., & Silva, S. R. (2019). Compost, bokashi y microorganismos eficientes: Sus beneficios en cultivos sucesivos de brócolis. *Idesia (Arica)*, 37(2), 59-66. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292019000200059>
- Pulgar, V. (2014). Las ocho regiones naturales del Perú. *Terra Brasilis. Revista da Rede Brasileira de História da Geografia e Geografia Histórica*, 3 [en línea], s. p. <https://doi.org/10.4000/terrabrasilis.1027>
- Rafael, A. (2015). *Proceso de producción y aplicación del producto microorganismos eficaces en la calidad de compost a partir de la mezcla de tres tipos de residuos orgánicos, Sapallanga-Huancayo*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio UNCP. <https://bit.ly/3nJ5hMx>
- Ramos, A., & Terry, E. (2014). Generalidades de los abonos orgánicos: importancia del bocashi como alternativa nutricional para suelos y plantas. *Cultivos Tropicales*, 35(04): 52-59. <https://bit.ly/370uigm>
- Rivas, N., & Silva, A. R. (2020). Calidad física y química de tres compost, elaborados con residuos de jardinería, pergamino de café y bora (*Eichhornia crassipes*). *Ciencia Unemi*, 13(32), 87-100. <https://bit.ly/372lvt1>
- Sharma A., Saha T. N., Arora A., Shah R., & Nain L. (2017). Efficient Microorganism Compost Benefits Plant Growth and Improves Soil Health in Calendula and Marigold. *Horticultural Plant Journal*, 3(2), 67-72. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hpj.2017.07.003>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2020). *Descarga de datos meteorológicos a nivel nacional*. <https://bit.ly/3lDD7Ax>
- Soriano, J. (2016). *Tiempo y calidad del compost con aplicación de tres dosis de "microorganismos eficaces"- concepción*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio UNCP. <https://bit.ly/30W0VaT>
- Vázquez, J., & Loli, O. (2018). Compost y vermicompost como enmiendas en la recuperación de un suelo degradado por el manejo de *Gypsophila paniculata*. *Scientia Agropecuaria*, 9(1) 43-52. <http://doi/10.17268/sci.agropecu.2018.01.05>
- Widman, A., Herrera, R., & Cabañas, V. D. (2005). El uso de composta proveniente de residuos sólidos municipales como mejorador de suelos para cultivos en Yucatán. Estudios preliminares. *Ingeniería*, 9(3): 31-38. <https://bit.ly/310A8dB>

Análisis numérico del comportamiento del flujo en la sección de la garganta de una tobera cónica experimental

(Numerical analysis of the flow behavior in the throat section of an experimental conical nozzle)

San Luis B. Tolentino-Masgo¹, María Alejandra Parco², Simón Caraballo³, Leonardo Lacruz⁴, Vicente Marcano⁵, John Ferreira⁶, Jorge Mírez⁷

Resumen

El patrón de flujo en toberas supersónicas lo definen los perfiles aerodinámicos de la geometría de las paredes internas, entre otros parámetros, donde la garganta es una sección crítica. En el presente trabajo, el objetivo es analizar el comportamiento del flujo en la sección recta de la garganta de una tobera cónica experimental de un motor de cohete sonda de combustible sólido. El flujo sobreexpandido se simuló con el código ANSYS-Fluent en un dominio computacional 2D, empleando el modelo RANS y el modelo de turbulencia de Menter, y la ecuación de Sutherland para la viscosidad en función de la temperatura. Se llevaron a cabo cinco casos de estudio para la longitud de garganta en el rango de 1-10 mm. Se obtuvo fluctuaciones de número de Mach, presión y temperatura, ondas de choque oblicuas en la sección de la garganta para la longitud de 10 mm; para longitudes menores disminuyó la intensidad de la magnitud del choque. Se concluye que para la longitud de garganta de 1 mm el flujo es transónico sin la presencia de choques oblicuos. En la sección divergente, las ondas de choque varían en su intensidad y cambian de posición.

Palabras clave

Choque oblicuo, fluctuación, longitud de garganta, tobera cónica, simulación.

Abstract

The flow pattern in supersonic nozzles is defined by the aerodynamic profiles of the geometry of the internal walls, among other parameters, the throat being a critical section. In the present work, the objective is to analyze the behavior of the flow in the straight section of the throat of an experimental conical nozzle of a solid fuel probe rocket engine. The over-expanded flow was simulated with the ANSYS-Fluent code in a 2D computational domain, using the RANS model and the Menter turbulence model, and the Sutherland equation for viscosity as a function of the temperature. Five case studies were performed for the throat length in the range of 1-10 mm. Fluctuations of Mach number, pressure and temperature, oblique shock waves in the throat section were obtained for the length of 10 mm; for shorter lengths the intensity of the shock magnitude decreased. It is concluded that, for the throat length of 1 mm, the flow is transonic without the presence of oblique shocks. In the diverging section, shock waves vary in intensity and change position.

Keywords

Oblique shock, fluctuation, throat length, conical nozzle, simulation.

1. Introducción

El cohete sonda es diseñado para llevar carga útil al espacio, su longitud varía de acuerdo con sus etapas y en cada etapa contiene un motor. Cuando el motor emplea combustible sólido,

- 1 Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre. Vicerrectorado Puerto Ordaz, CEE, Venezuela. / Universidad Nacional de Ingeniería, GMMNS, Perú. [sanluist@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6320-6864].
- 2 Universidad de Los Andes, GCAE, Venezuela. [frau.spock@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1208-1157].
- 3 Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre. Vicerrectorado Puerto Ordaz, Venezuela. [scaraballo@unexpo.edu.ve, https://orcid.org/0000-0002-0170-2448].
- 4 Universidad de Los Andes, GCAE, Venezuela. [leonardolacruz333@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8364-3401].
- 5 Universidad de Los Andes, GCAE, Venezuela. [vicente.marcano@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0068-6642].
- 6 Universidad de Los Andes, GCAE, Venezuela. [jdferreira1@protonmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6195-3516].
- 7 Universidad Nacional de Ingeniería, GMMNS, Perú. [jmirez@uni.edu.pe, https://orcid.org/0000-0002-5614-5853].

este se quema en la cámara de combustión a alta presión y temperatura; por tanto, los gases quemados se ven obligados a salir de la tobera convergente-divergente a velocidad supersónica, generando el empuje del cohete.

Cuando el flujo está estrangulado en la garganta, según la presión de escape a la salida de la tobera, el flujo puede estar sobreexpandido, adaptado o subexpandido (Sutton & Biblarz, 2016). Para el flujo sobreexpandido, en la sección divergente de la tobera se presentan ondas de choque normales, oblicuas y de expansión, separación del flujo, cargas laterales y gradientes adversos de presión (Sutton & Biblarz, 2016; Schlichting & Klaus, 2017; Anderson, 2017; Zucker & Biblarz, 2019).

Las formas de las ondas de choque y la separación del flujo de las paredes de la tobera se pueden visualizar por medios experimentales mediante la captura de imágenes con la técnica Schlieren (Dagaro et al., 2019). La turbulencia del flujo (Schlichting & Klaus, 2017) se puede recrear con modelos de turbulencia aplicando la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) (Blazek, 2015); y, en la salida de la tobera, el flujo puede ser controlado y manipulado por diferentes mecanismos (Shimshi, et al., 2015; Stark & Génin, 2016; Kostic et al., 2017).

Diferentes instituciones de universidades de distintos países, tales como Estados Unidos, Alemania, Francia, Polonia, Australia, Japón, China, Italia, España, Corea, entre otros, han centrado su interés en el desarrollo de cohetes sonda con base en proyectos académicos y de investigación (Okninski & Wolanski, 2015; Verberne et al., 2015, 27-29 de julio; Barato et al., 2016, 25-27 de julio; Schüttauf et al., 2017; Huh et al., 2017; Nilsen et al., 2019, 7-11 de enero; Heeg et al., 2020).

En América del Sur, dos países tienen el mayor avance tecnológico, Brasil y Argentina. La Agencia Espacial Brasileña (AEB) ha desarrollado cohetes sonda de varias series y etapas, entre ellos, el VLS es el más emblemático; y algunos cohetes sonda fueron lanzados entre 1965 y 1966 (De Gouyon, 2019). En Argentina, se canceló el proyecto Cóndor (De León, 2016, 26-30 de septiembre). Actualmente, el desarrollo de cohetes sonda está a cargo de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). A partir de 2007, lanzaron varios cohetes de la serie Tronador y, a partir de 2014, lanzaron vehículos experimentales suborbitales (Vera, 2015); entre 2015 y 2020 han desarrollado diferentes proyectos en el campo aeroespacial (Schulz et al., 2020). En Perú, la Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA) desarrolló el cohete sonda Paulet I, entre otros cohetes sonda (Canales, 2013, 27 de marzo); en 2004 realizaron diferentes pruebas de lanzamientos de cohetes sondas, así como vienen desarrollando propuestas de modelos de cohetes sonda (Villanueva, 2018, 3-10 de marzo). En Colombia, diferentes universidades están involucradas en el desarrollo de cohetes sonda, tal es el caso del Proyecto Uniandino Aeroespacial (PUA), donde, en 2009, lanzaron el cohete experimental Ainkaa 1 de combustible sólido de 20 kg de empuje; o el desarrollo del cohete sonda Libertador (Morales & Mendoza, 2017).

En la República Bolivariana de Venezuela, en la Universidad de Los Andes (ULA) con sede en el Estado Mérida, se diseñan y construyen cohetes sonda propulsados por motores de combustible sólido, como parte del Proyecto Cohete Sonda Serie ULA que desarrolla la Comisión Rectoral del Programa de Ciencias Espaciales y el Grupo de Ciencias Atmosféricas y del Espacio (GCAE) (Tolentino et al., 2017).

Desde 2006, se han llevado a cabo cuatro pruebas de rendimiento aerodinámico y propulsión de los cohetes sonda ULA-1 y ULA-2, para lo cual, se han hecho diez pruebas en estática de los motores combustible sólido (Parco, 2014). Las toberas diseñadas por la ULA están en su fase experimental, son de geometría cónica convergente-divergente y la garganta tiene una longitud de sección recta determinada, conocida como longitud de garganta.

De la población del grupo de motores de cohetes sonda diseñados por el GCAE, una tobera fue clasificada como ULA-1A XP, la cual fue sometida a ensayos experimentales en un banco de pruebas en estática (Figura 1). Parco (2014) realizó un estudio térmico del flujo en diferentes secciones de la tobera, donde, en la sección de la garganta, la temperatura registró fluctuaciones. Lacruz et al. (2016) llevaron a cabo un estudio de las oscilaciones de la presión interna del flujo en la cámara de combustión, que para ambos casos de estudio es flujo sobreexpandido con presencia de ondas de choque en la sección divergente durante los ensayos experimentales.

Sustentados con los datos experimentales de Parco (2014) y Lacruz et al. (2016), Tolentino et al. (2017) hicieron simulaciones numéricas 2D del campo del flujo sobreexpandido para un dominio computacional de la tobera cónica experimental ULA-1A XP. Del estudio numérico, en la sección de la garganta de sección recta de diámetro 15.16 mm y longitud 16.7 mm, obtuvieron ondas de choque oblicuas, donde la velocidad del flujo en ciertas regiones es transónica y en otras, supersónica, por lo cual, el flujo presentó desaceleraciones. En ese sentido, motivó al GCAE a continuar con la investigación.

En el presente trabajo, se simula el flujo en un dominio computacional 2D con simetría axial de la tobera cónica experimental ULA-1A XP para diferentes longitudes de la sección recta de la garganta en el rango de 1-10 mm, con el objeto de analizar numéricamente el comportamiento del flujo en la sección de la garganta. Se presenta el fundamento matemático, el dominio computacional y el método de solución computacional. Se exponen los resultados de los campos de flujo y los perfiles de número de Mach, presión estática y temperatura estática. Posteriormente, se exponen las conclusiones del análisis realizado.

Figura 1. Banco de pruebas en estática. (a) cohete sonda de combustible sólido serie ULA, en la plataforma de lanzamiento; (b) despegue del cohete sonda, (c) motor de cohete sonda de combustible sólido ULA-1A XP, donde, en el extremo derecho del tubo motor, se muestra la tobera cónica acoplada; (d) posición del motor cohete en estática para medir la temperatura (Parco, 2014), y (e) banco de prueba en estática para medir la presión y empuje e los motores de cohetes sonda serie ULA (Lacruz et al., 2016)



2. Materiales y métodos

2.1. Fundamento matemático

En el presente trabajo, la simulación del campo de flujo compresible fue resuelta mediante el modelo de las ecuaciones de Navier-Stokes de número de Reynolds promedio (RANS, por sus siglas en inglés) con el código ANSYS-Fluent v.12.1 que aplica el método de volumen finito (MVF). Las cuatro ecuaciones de gobierno empleadas en el campo de flujo son (1), (2), (3) (ANSYS, 2019) y (4) (Anderson, 2017), las cuales, para las condiciones de flujo en estado estacionario y en forma compacta, se expresan así:

Ecuación de conservación de la masa:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}_i) = 0 \quad (1)$$

Donde la densidad es ρ y la velocidad, \mathbf{u} .

Ecuación de cantidad de movimiento:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}_i \mathbf{u}_j) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\boldsymbol{\tau}}) + \nabla \cdot (-\rho \overline{\mathbf{u}_i \mathbf{u}_j}) \quad (2)$$

Donde la presión es p ; el tensor de tensiones, $\bar{\boldsymbol{\tau}}$, y las tensiones de Reynolds, $-\rho \overline{\mathbf{u}_i \mathbf{u}_j}$. La ecuación (2) está cerrada, ya que se incluye las tensiones de Reynolds.

Ecuación de la energía:

$$\nabla \cdot (\mathbf{u}_i (\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T + (\bar{\boldsymbol{\tau}}_{eff} \cdot \mathbf{u}_i)) \quad (3)$$

Donde, la energía total es E ; la temperatura T ; la conductividad térmica efectiva, k_{eff} , y el tensor de tensiones efectivo, $\bar{\boldsymbol{\tau}}_{eff}$.

Ecuación de estado:

$$p = \rho RT \quad (4)$$

Donde la constante del gas es R . Por despeje, la densidad se expresa como $\rho = p/RT$.

Para flujo compresible, la relación de presiones (5) y de temperaturas (6) en función del número de Mach, M , el cual es el parámetro dominante (Anderson, 2017; Zucker & Biblarz, 2019), se expresan así:

$$\frac{p_0}{p} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (5)$$

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{(\gamma-1)}{2} M^2 \quad (6)$$

Donde la presión de estancamiento es p_0 ; la temperatura de estancamiento T_0 y la relación de calores específicos, γ .

Las unidades de los parámetros termodinámicos de las ecuaciones del (1) al (6) se expresan así: ρ (kg/m³), u (m/s), E (J), p (Pa), T (K), R (J/(kg·K)), p_0 (Pa), T_0 (K), donde el número de Mach y la relación de calores específicos son adimensionales.

La velocidad del flujo, en términos de número de Mach, se establece para flujo incompresible $M \leq 0.3$; flujo subsónico $0.3 \leq M \leq 0.8$; flujo transónico $0.8 \leq M \leq 1.2$; flujo sónico $M = 1$, y flujo supersónico $1.2 \leq M \leq 5$. Para flujo hipersónico $M > 5$ (Anderson, 2019).

La ley de viscosidad de Sutherland (Anderson, 2017) en función de la temperatura, se expresa así:

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{T_0 + S}{T + S} \quad (7)$$

Donde la viscosidad de referencia es μ_0 (kg/(m·s)), la temperatura de referencia, T_0 (K), y la temperatura efectiva, S (K).

En las simulaciones numéricas, el flujo se consideró como gas ideal. Esto es para el gas que se produce en la cámara de combustión por la quema del propelente sólido compuesto por nitrato de potasio y sacarosa ($\text{KNO}_3 + \text{C}_{12}\text{H}_{12}\text{O}_{11}$) (Lacruz et al., 2016). Como parámetros, se fijó la relación de calor específico $\gamma = 1.4$, la constante del gas $R = 287\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, el calor específico a presión constante $C_p = 1006.43\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ y la conductividad térmica $k = 0.0242\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Cabe destacar que la quema del combustible sólido en la cámara no es totalmente homogénea, y esto hace que los parámetros del gas no sean fácilmente medibles, por lo que se tiene que recurrir a la teoría cinética de los gases y del gas real. Por tanto, al considerar un gas homogéneo, facilita el empleo de la ecuación de gas ideal. Además, la viscosidad de diferentes tipos de gases se acondiciona en función de la temperatura, donde Sutherland propuso la ecuación (7), que es ampliamente empleada en códigos computacionales para flujo supersónico.

Para la simulación del flujo, se empleó el modelo de turbulencia de transporte de los esfuerzos cortante SST $k-\omega$ de Menter (1994). Este modelo de turbulencia contiene dos ecuaciones: una para la energía cinética específica k , y la otra para la tasa de disipación específica ω , por lo cual, logra mejorar las respuestas en presencia de gradientes adversos de presión y separación de flujo. Cabe destacar que, previamente, el modelo de turbulencia de Menter fue evaluado por Tolentino & Caraballo (2017), Tolentino (2019; 2020), donde los resultados numéricos se ajustan a los datos experimentales de presión y de velocidad, y es un modelo de turbulencia adecuado para simular la turbulencia del flujo en el presente trabajo.

2.2. Dominio computacional

La tobera tónica con longitud de garganta ULA-1A XP, en su diseño original, tiene un ángulo medio de la sección convergente de 29° y de la divergente de 11°, donde las dimensiones básicas se muestran en la Figura 2a. Donde, en la garganta, la relación de longitud y diámetro es $L_g/D_g = 1.101$.

Para el presente trabajo, se consideraron cinco casos de estudio para la longitud de la garganta, y para la longitud de la sección divergente; se mantiene constante la longitud de la sección convergente de 37.82 mm, así como, valores constantes de los diámetros de la convergente, de la garganta y de la divergente.

Al ser la geometría de la tobera simétrica alrededor del eje x , se consideró simular el flujo para un dominio computacional 2D con simetría axial en el eje x , tal como se muestra el dominio computacional en la Figura 2b. Cabe resaltar que la simplificación de la geometría de 3D a 2D contribuye en la reducción de la cantidad de celdas de la malla, tiempo de procesamiento y coste computacional del equipo, y es muy común las simplificaciones para sólidos de revolución y geometrías simétricas para casos idealizados, donde los resultados no son afectados en las precisiones numéricas de manera significativa con respecto a un flujo en un dominio 3D. No obstante, el dominio 2D tiene su limitación al no permitir proyectar el flujo en la sección transversal, por lo cual un dominio 3D aporta más información para el análisis del flujo cuando se presenta el choque en la divergente. Cabe señalar que en casos idealizados se considera que el flujo es simétrico en la dirección del eje axial, destacando que los estudios experimentales han demostrado que el flujo es asimétrico, como lo reportado por Östlund & Muhammad (2005).

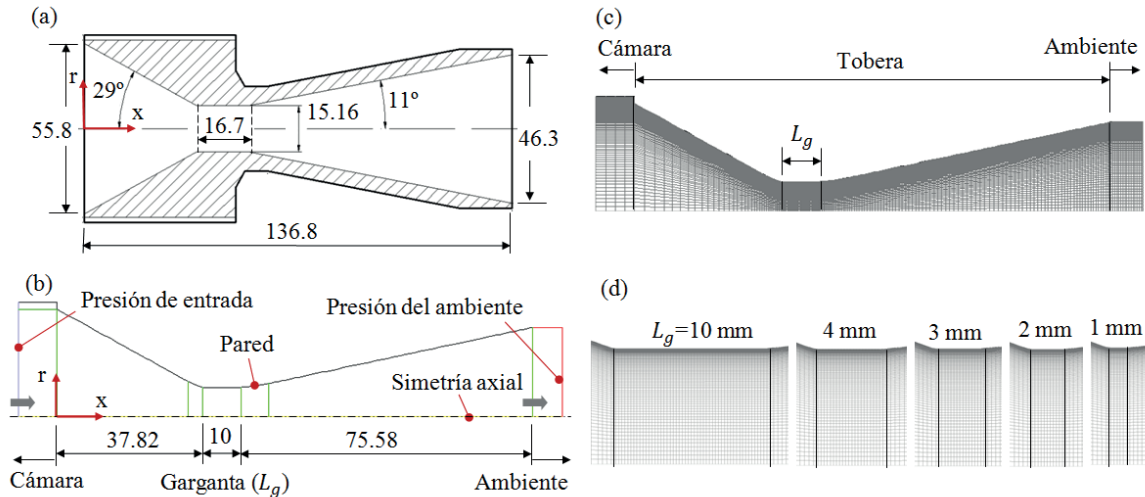
El dominio computacional está compuesto por una sección de la cámara de combustión, la tobera cónica y el ambiente de la atmósfera, donde la longitud de garganta se estableció con medida de $L_g = 10$ mm, lo cual corresponde para la longitud de la divergente $L_d = 75.58$ mm, como condición inicial. Otros dominios se construyeron para $L_g = 4$ mm y $L_d = 69.58$ mm; $L_g = 3$ mm y $L_d = 68.58$ mm; $L_g = 2$ mm y $L_d = 67.58$ mm, y $L_g = 1$ mm y $L_d = 66.58$ mm; donde, para el rango de la longitud de garganta 1-10 mm, el ángulo medio se encuentra en el rango de ~ 11.5 a $\sim 13.5^\circ$; pues, a medida que se disminuye la longitud divergente, el ángulo medio se incrementa al considerar valores constantes para los diámetros de la garganta y de la divergente.

La consideración de una sección de dominio de longitud corta de la cámara de combustión ha sido con el fin de direccionar el flujo cuando se produce la combustión, ya que esta es un tubo largo donde se almacena el combustible sólido, así como la sección del dominio del ambiente de la atmósfera para la descarga del flujo. Además, en el mismo dominio se señala en dónde se aplican las condiciones de borde.

Las condiciones del flujo en la cámara de combustión se establecieron a la presión absoluta de 709 kPa y temperatura de 1673.15 K, basados en los experimentos de Lacruz et al. (2016) y Parco (2014); para el ambiente de la atmósfera, se fijaron a 98 kPa y 293.15 K. Las paredes de la cámara y de la tobera se consideraron adiabáticas y la velocidad del flujo en las paredes se consideró nula por la condición de no deslizamiento. Además, en la simetría axial la velocidad del flujo en la dirección radial es nula. Todas estas condiciones de borde se aplicaron para la tobera con longitud de garganta de 10 mm, 4 mm, 3 mm, 2 mm y 1 mm, respectivamente.

El dominio se malló con malla estructurada con celdas cuadriláteras, el cual fue discretizado por el MVF para $L_g = 10$ mm y para las longitudes de garganta de 1-4 mm, las cuales se muestran en las Figuras 2c y 2d. El refinamiento de la malla se aplicó para las regiones adyacentes a las paredes de la cámara y de la tobera, debido a la presencia del esfuerzo cortante en esas regiones.

Figura 2. Longitudes de garganta de 1-4 mm. (a) dimensiones principales de la tobera cónica experimental ULA-1A XP; (b) dominio computacional 2D con simetría axial en el eje x para $L_g = 10$ mm; (c) dominio mallado con celdas cuadriláteras, y (d) detalles de mallado para los cinco casos de longitud de garganta.



Para el estudio de convergencia numérica, se consideraron tres dominios para la longitud de garganta fija $L_g = 10$ mm de la tobera, los cuales fueron mallados en la plataforma ANSYS-Meshing, y se discretizó mediante la interacción de ICEM-CFD. El primer dominio se malló con 18 349 celdas, el segundo con 18 453 celdas, y el tercero con 18 532 celdas. Para los tres dominios mallados, para $L_g = 10$ mm, se obtuvo el sesgo equiángulo $Q_{EAS} \leq 0.22$. Cengel y Cimbala (2019) establecen que, para cualquier celda 2D de un dominio computacional, para que la malla sea de buena calidad, el sesgo equiángulo debe estar en el rango de $0 \leq Q_{EAS} \leq 1$.

2.3. Método de solución computacional

Para la simulación del flujo en el código ANSYS-Fluent, se consideró la opción de solución de análisis basado en densidad para un fluido compresible, y simetría axial 2D. Para la turbulencia del flujo, se optó por el modelo de Menter, y para la viscosidad en función de la temperatura, la ecuación de Sutherland. Para el flujo, la turbulencia de la energía cinética y para la disipación específica, se seleccionó la opción Second Order Upwin. Para el monitor residual, se determinó un valor fijo de 0.00001, tanto para continuidad, velocidad y energía. Se realizaron 35 000-39 000 iteraciones para obtener la convergencia numérica, y se obtuvieron los resultados finales de número de Mach, presión estática y temperatura estática. Para el procesamiento de datos, se utilizó un equipo con las siguientes características: Laptop marca Síragon, modelo M54R, Intel Core 2 Duo, dos procesadores de 1.8 GHz, y memoria RAM de 3 GB.

3. Resultados y discusión

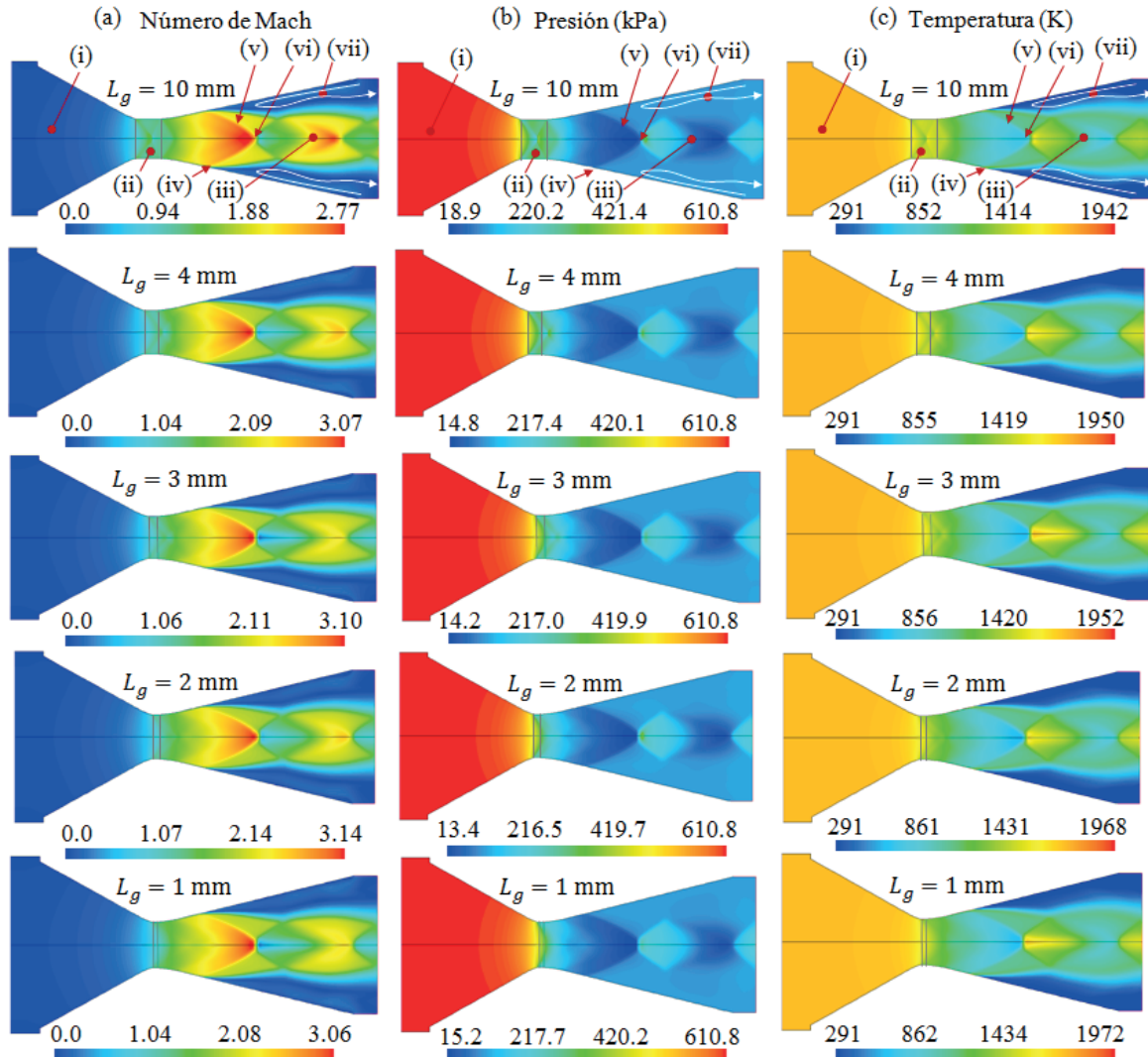
3.1. Campo de flujo de número de Mach, presión y temperatura

En el dominio del campo de número de Mach (Figura 3a) se observan las regiones donde el flujo es subsónico, transónico y supersónico, así como se muestra en qué regiones sus magnitudes son máximas y mínimas, por medio de la barra de colores. En la sección divergente el flujo está sobreexpandido, lo cual causa separación del flujo de la pared. Se observa en qué regiones del flujo se inicia la separación, así como la recirculación. Para todas las secciones divergentes, las posiciones y las magnitudes de las ondas de choque varían a medida que la longitud de la garganta disminuye, por lo cual, definen un patrón de choque. En la sección de la garganta, para la longitud de la garganta $L_g = 10$ mm se aprecia la presencia de una onda de choque oblicua y reflejada, lo cual indica que existe una transición en el régimen del desarrollo del flujo; y a medida que la longitud de la garganta disminuye para $L_g = 4$ mm, 3 mm, 2 mm, la presencia de las ondas de choque oblicua se van disipando, y para la longitud de $L_g = 1$ mm no hay ondas de choque oblicuas, por lo cual, el flujo para esta longitud no presenta perturbaciones significativas en su desarrollo.

En el campo de presión estática (Figura 3b) se muestran las regiones donde se producen las caídas e incrementos de la presión, y se identifican por medio de los gradientes de la barra de colores de datos donde la presión es máximo y mínimo. Debido al desprendimiento de la capa límite de la pared y separación del flujo de la pared producto de la onda de choque oblicua, se presenta un gradiente adverso de presión en la región de recirculación de flujo con una caída de presión menor a la de la atmósfera local, por tanto, el flujo de aire de la atmósfera local es forzado a ingresar rozando la pared divergente de la tobera.

Así mismo, para el campo de la temperatura estática (Figura 3c), se muestran las regiones del flujo subsónico, transónico y supersónico, y se muestra en qué regiones del flujo la temperatura es mínima y máxima por medio de la barra de colores. Cuando se produce una caída de presión, la temperatura del flujo disminuye, y cuando se incrementa la presión, también se incrementa la temperatura; esto se debe a la naturaleza física del fluido donde la energía interna disminuye a un nivel inferior, consecuencia de la expansión de las moléculas por la disminución de su presión antes de que se presente el choque. Así mismo, después del choque, el flujo es frenado, por tanto, al ser forzado las moléculas a estar más juntas incrementan su energía interna por la resistencia que presentan por el incremento de la presión; en consecuencia, la temperatura se incrementa. Los cambios bruscos de las variaciones de las magnitudes de las temperaturas están presentes en las regiones donde se presenta el choque. De igual manera, en la región donde se presenta la recirculación del flujo, se observa un gradiente de temperatura estática de menor magnitud con respecto a las otras regiones del flujo.

Figura 3. Campo de la temperatura estática. (a) campo de número de Mach, (b) campo de presión estática (kPa) y (c) campo de temperatura estática (K). Se señalan para los tres campos de flujo: (i) región subsónica en la convergente, (ii) región transónica en la longitud de garganta, (iii) región del chorro supersónico en la divergente, (iv) inicio de separación de flujo, (v) choque oblicuo, (vi) disco de Mach y (vii) región de circulación de flujo



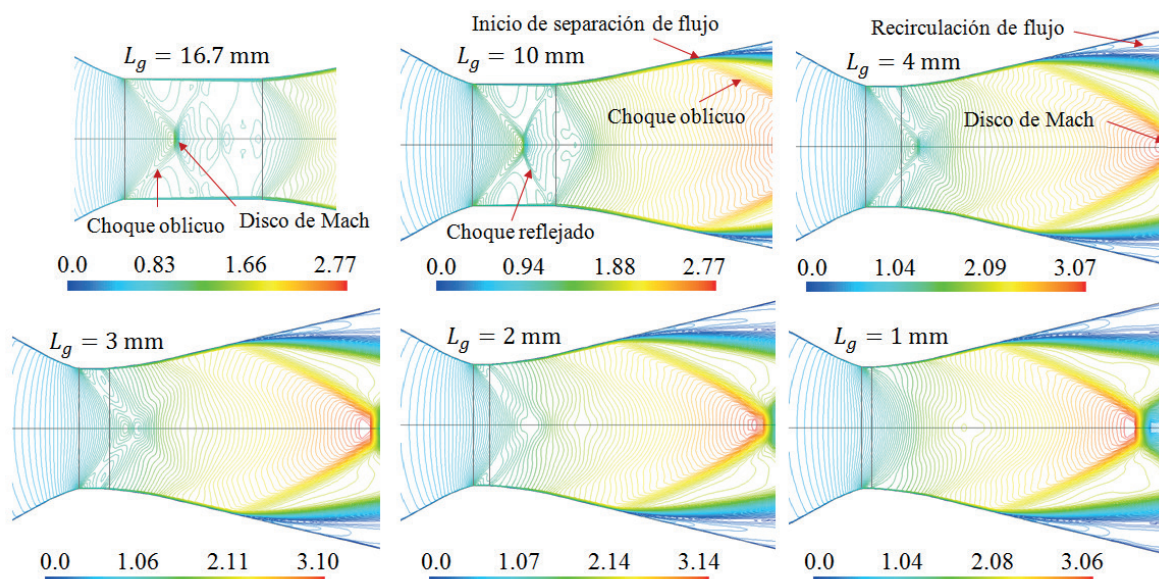
3.2. Sección de la garganta: líneas de contorno de número de Mach

En la Figura 4 se muestran las líneas de contorno para distintas secciones de la garganta con diferentes longitudes. En la sección de la garganta para la longitud de $L_g = 10$ mm, se observa una onda de choque oblicuo, la onda reflejada y una onda de choque normal, que es el disco de Mach; así como en la sección divergente se muestra el inicio de la separación del flujo, la recirculación de flujo, el choque oblicuo y reflejado y el disco de Mach. Para el caso de la sección de la garganta, las formas de las ondas de choque son similares a los obtenidos por Tolentino et al. (2017) para $L_g = 16.7$ mm, la cual se incluye en la misma figura como referencia (Figura 4a).

A pesar de que se ha disminuido la longitud de la garganta de $L_g = 16.7$ mm a $L_g = 10$ mm, se mantiene casi similar el mismo patrón de comportamiento del flujo en la sección de la garganta.

Para $L_g = 4$ mm, el choque reflejado no está presente, solamente el choque oblicuo, y el disco de Mach disminuye su intensidad ubicando su posición en la sección divergente, donde el desarrollo del flujo es diferente al caso anterior, para $L_g = 10$ mm. Al disminuir la longitud de la garganta a $L_g = 3$ mm, la onda de choque oblicua disminuye su intensidad con tendencia a disiparse y abarca espacio a la entrada de la divergente. Para la longitud de la garganta $L_g = 2$ mm, la fluctuación del número de Mach ha disminuido su intensidad drásticamente. Para la longitud de la sección de la garganta de $L_g = 1$ mm, se tiene un nuevo patrón de flujo, donde las líneas de contorno muestran que el flujo tiene un mejor comportamiento con respecto a los casos anteriores.

Figura 4. Líneas de contorno de número de Mach para diferentes longitudes de la sección recta de la garganta.



3.3. Perfiles de número de Mach, presión y temperatura

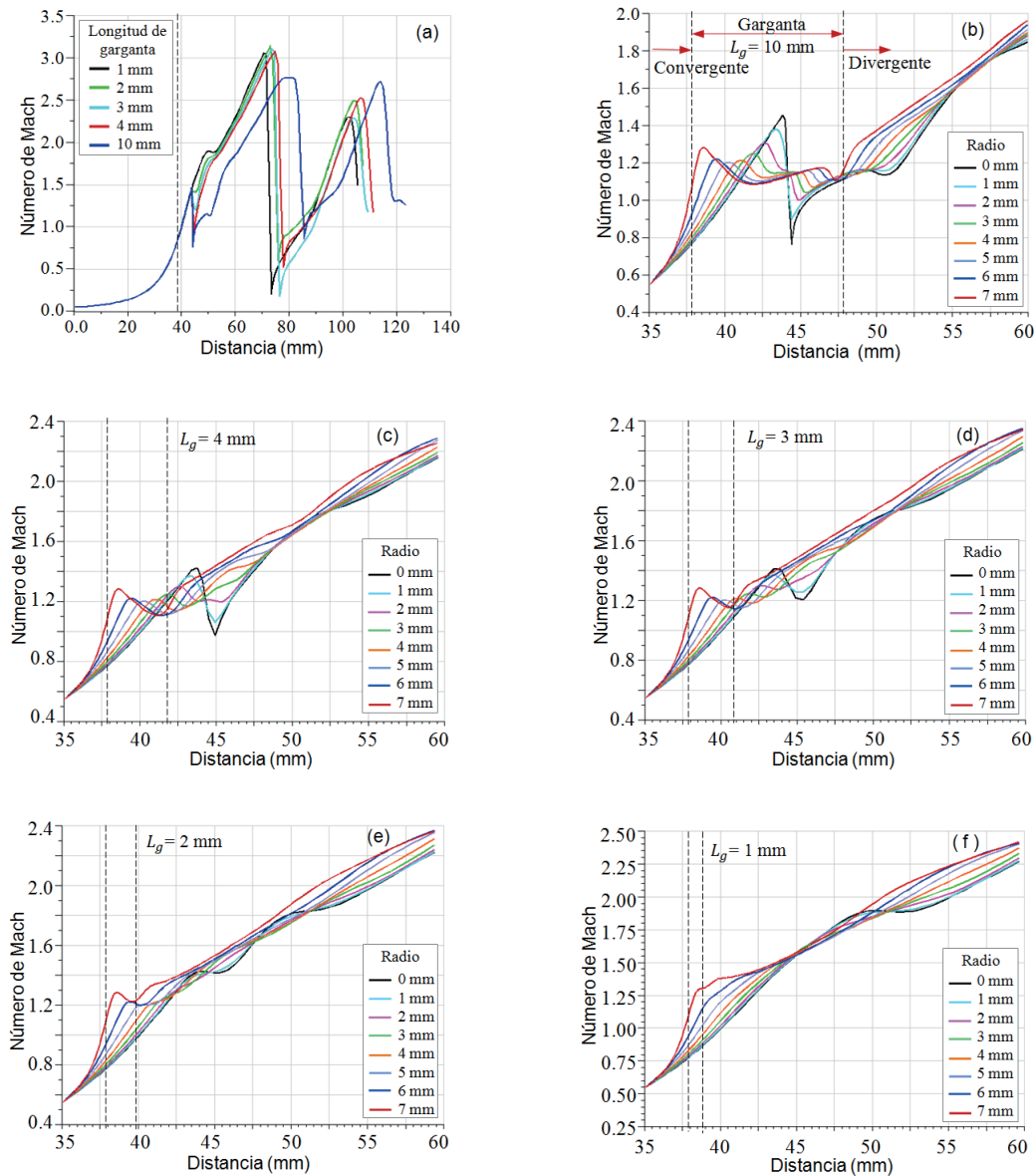
Los perfiles de número de Mach, presión estática y temperatura estática evaluados en la simetría axial muestran diferentes patrones, los cuales se aparecen en la Figuras de la 5 a la 7, donde para las Figuras 5a, 6a y 7a corresponden los perfiles para todo el dominio de la tobera, y las otras corresponden para la sección de la garganta y una sección corta de la divergente.

Para el caso del número de Mach, se muestran los valores máximos y mínimos, y en qué distancias de referencias se producen las ondas de choque en la sección de la garganta y en la sección divergente (Figura 5a), por lo cual, el flujo se acelera y desacelera. A medida que se disminuye la longitud de la sección recta de la garganta, las ondas de choque en la sección divergente se producen con mayor intensidad y cambian de posición. Se observa cómo se comporta el flujo en la simetría axial, donde a partir de la distancia estimada entre 43.5 mm a 44 mm se produce una onda de choque normal dentro de la longitud de garganta para $L_g = 10$ mm. A medida que la longitud de la garganta disminuye su longitud para $L_g = 4$ mm y $L_g = 3$ mm, la

intensidad de la onda disminuye y se presenta en la sección divergente. Para $L_g = 2$ mm, el comportamiento del perfil tiene doble escalón y la desaceleración del flujo es débil aguas abajo, y para $L_g = 1$ mm tiene un solo escalón en la sección divergente, y en la sección de la garganta el flujo tiende a acelerarse sin perturbaciones.

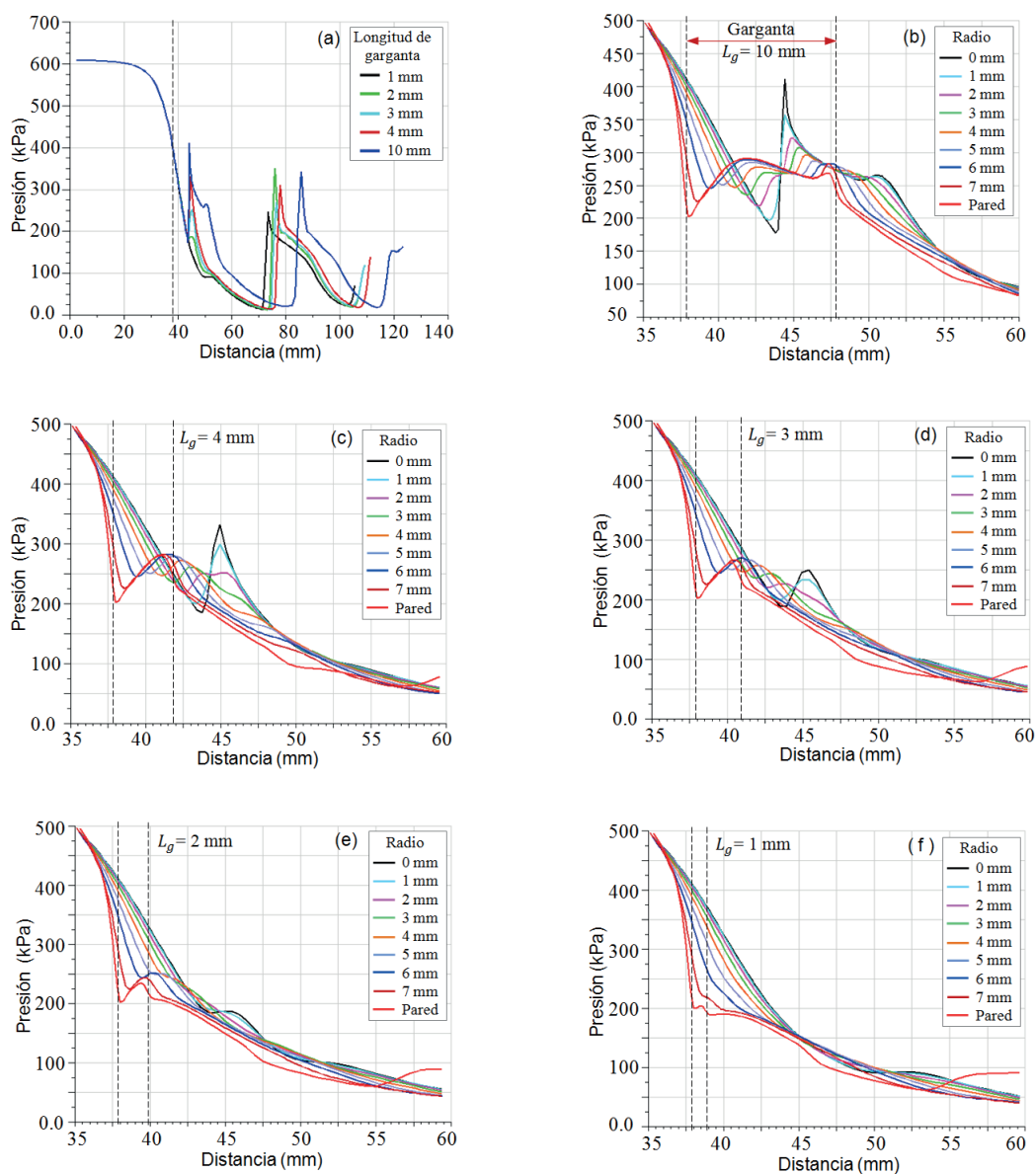
Los perfiles de detalles evaluados en la distancia radial, para el tramo en la dirección axial en el rango de 35-60 mm (Figuras 5b-5f), muestran cómo fluctúa la magnitud del número de Mach. A medida que disminuye la longitud de la garganta, el flujo tiende a disminuir su transición, por ende, tiende a acelerarse en ciertas regiones. Para la longitud de la garganta $L_g = 1$ mm, el flujo tiene un buen desarrollo y no presenta desaceleraciones, excepto para una región ínfima de flujo adyacente a la pared, esto es, para el perfil de radio 7 mm.

Figura 5. Perfiles de número de Mach para diferentes longitudes de garganta



Los perfiles de presión estática (Figuras 6a-6f) muestran las caídas e incremento de las presiones en las regiones donde se forman las ondas de choques en la sección de la garganta y en parte de la sección divergente. En la dirección radial se muestra el comportamiento de las trayectorias de las curvas y se observa cómo varía la magnitud de la presión, con referencia del eje hacia la pared y en la pared misma, donde para la longitud $L_g = 1$ mm, las fluctuaciones han disminuido considerablemente.

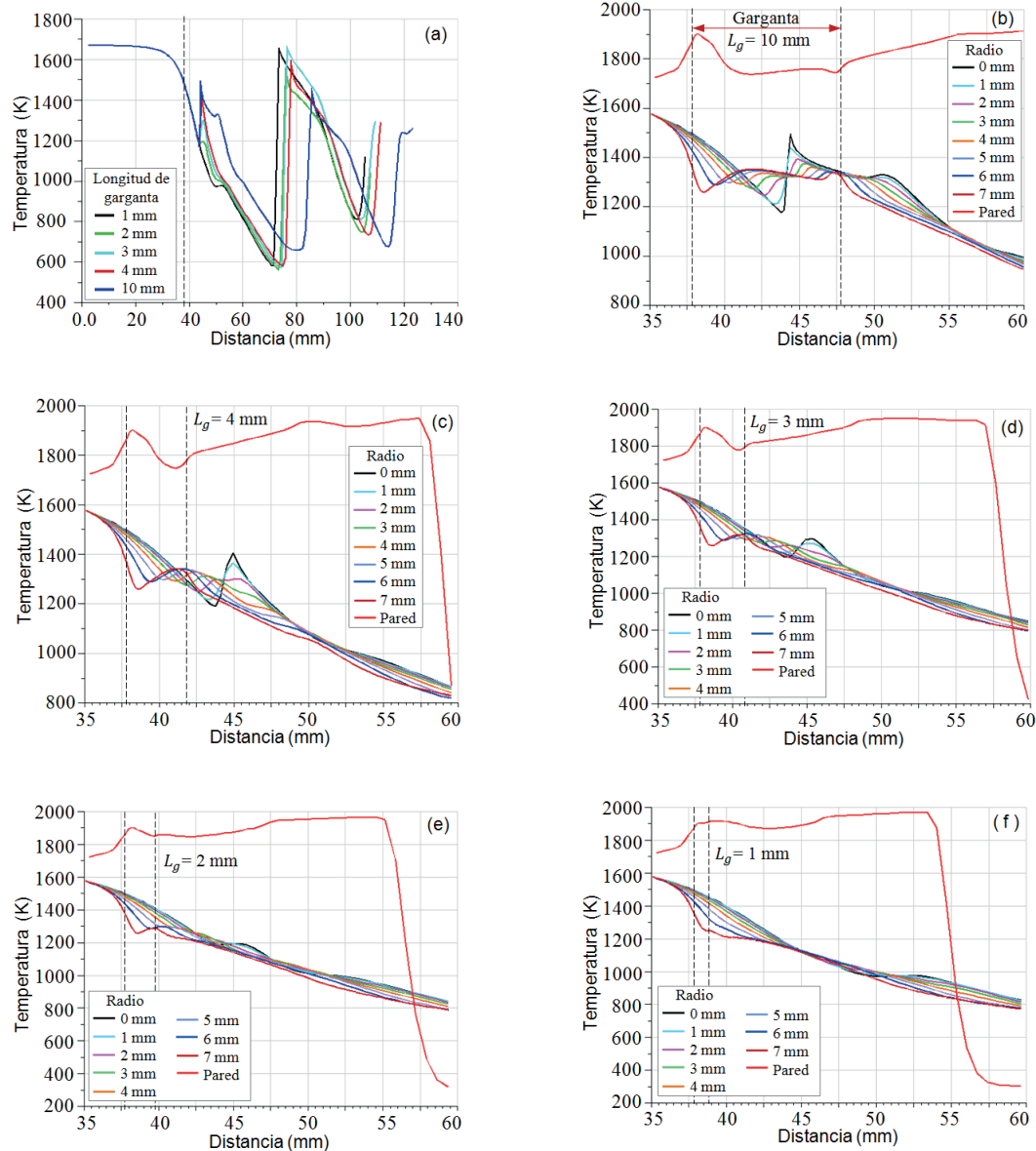
Figura 6. Perfiles de presión estática para diferentes longitudes de garganta



Así mismo, las trayectorias de las curvas de temperatura estática (Figuras 7a-7f) evaluadas en la simetría axial y en la dirección radial muestran su comportamiento, se observa que la trayectoria de la curva evaluada en la pared adiabática tiene un valor máximo donde se produce la onda de choque oblicuo, y es un lugar donde se inicia la separación del flujo de la pared, lo

cual ocasiona una recirculación del flujo por la caída de presión y, debido a esto, es inducido a ingresar de la atmósfera una porción de flujo de aire rozando la pared interna de la sección divergente, donde el flujo de aire ingresa a la temperatura de la atmósfera local.

Figura 7. Perfiles de temperatura estática para diferentes longitudes de garganta



De los resultados del campo de flujo y de los perfiles, para el dominio computacional de la tobera cónica experimental ULA-1A XP, el comportamiento del flujo es influenciado por la geometría del perfil aerodinámico de la longitud de la garganta. A mayor longitud, se presentan fluctuaciones de los parámetros termodinámicos, por lo cual, se manifiestan las ondas de choque. Los resultados numéricos muestran que para la longitud de la garganta $L_g = 1$ mm y $D_g = 15.16$ mm se tiene la relación $L_g/D_g = 0.0659$, donde el flujo presenta un mejor desarrollo y no presenta desaceleración. No obstante, en la divergente de longitud $L_d = 66.58$ mm, el cual tiene

un valor estimado del ángulo medio $\sim 13.5^\circ$, las posiciones de las ondas de choque oblicuas han cambiado de posición, así como se presenta la separación del flujo, los gradientes adversos de presión, y la transición de choque libre (FSS, por sus siglas en inglés) y separación de choque restringida (RSS, por sus siglas en inglés) (Östlund & Muhammad, 2005). El efecto térmico influye en el campo de flujo en la tobera (Ding et al., 2017), sin embargo, en el presente trabajo se ha considerado la tobera con paredes adiabáticas. No obstante, el perfil aerodinámico en la sección de la garganta para relaciones $L_g/D_g > 0.1$ influye en el desarrollo del flujo en toberas cónicas supersónicas, así como la longitud de la divergente.

Otros estudios experimentales y numéricos en toberas con paredes planas y longitudes variables en la sección divergente han reportado patrones de choques oblicuos en el chorro supersónico (Giglmaier et al., 2014; Nair et al., 2020; Verma et al., 2018; Arora & Vaidyanathan, 2015; Zebiri et al., 2020), por lo cual, a medida que el ángulo medio disminuye, el patrón de choque oblicuo cambia su configuración.

La sección divergente de la tobera con ángulo medio de 15° tiene buen desempeño, y es tomado como referencia en los diseños de las toberas y, típicamente, en diferentes diseños. El ángulo medio de la sección divergente está en el rango de 12° a 18° y es un factor que depende de la aplicación específica y de la trayectoria de vuelo (Sutton & Biblarz, 2016). Además, un factor que se debe tomar en cuenta en la sección de la garganta es el radio de curvatura, lo cual hace que el flujo tenga un buen desarrollo en las regiones adyacentes a las paredes.

Aunque la tobera cónica ULA-1A XP tiene un ángulo medio $\alpha = 11^\circ$ y una longitud de sección recta en la garganta de $L_g = 16.7$ mm, con respecto a su diseño original, la tobera ha presentado un buen desempeño en la fase experimental en estática y en dinámica (Parco, 2014; Lacruz et al., 2016), alcanzando los propósitos preestablecidos sobre su diseño; sin embargo, presentó fluctuaciones en la sección de la garganta. La pared de la sección de la garganta de la tobera ULA-1A XP tiene ligeras curvaturas, mas no son curvaturas como de la tobera cónica estudiada por Back & Cuffel (1966), quienes detectaron ondas de choque oblicuas en la sección divergente para un flujo sobreexpandido, para un ángulo medio de la divergente $\alpha = 15^\circ$.

En el presente trabajo, se ha analizado el comportamiento del flujo en la sección de la garganta para un flujo sobreexpandido para diferentes longitudes de garganta. En el caso de estudio, para un flujo subexpandido para la misma sección de la garganta estudiada de longitud 10 mm, en la sección de la garganta no se presentarán ondas de choque oblicuas, el flujo se desacelerará sin fluctuaciones, luego de salir de la garganta se acelerará, por lo cual, el perfil de velocidad en la garganta presentará un patrón con forma de escalón; este comportamiento hipotético del flujo, de manera similar, fue obtenido por Tolentino et al. (en prensa) para una geometría similar con longitud de garganta para una tobera cónica con relación $L_g/D_g = 1.077$ y ángulo medio de 15° .

4. Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con los análisis elaborados sobre el comportamiento del campo de flujo en la tobera cónica experimental ULA-1A XP con diferentes longitudes de la garganta, se concluye que:

En la sección divergente se presentan patrones de choque, variando su magnitud y posición por la influencia de la variación de la longitud de la garganta.

En la sección de la garganta, para las longitudes de 10 mm, 4 mm, 3 mm y 2 mm, se presentan fluctuaciones de la velocidad del flujo, con presencia de ondas de choque oblicuo y disco de Mach,

que son de mayor intensidad para la longitud de 10 mm; y a medida que disminuye la longitud de garganta hasta 2 mm, las fluctuaciones disminuyen su intensidad. Para la longitud de 1 mm, no se presentan fluctuaciones de los parámetros termodinámicos de velocidad, presión y temperatura, por lo cual, el flujo tiene un mejor desarrollo en su aceleración sin presencia de ondas de choque. Sin embargo, para un valor mayor de $L_g/D_g > 0.1$, la longitud de garganta influye en el régimen de flujo.

Para trabajos a futuro, se recomienda emplear la misma geometría de la tobera para dominios 2D y 3D y simular para un flujo subexpandido con otros códigos de la CFD y comparar con los resultados de este trabajo.

Referencias

- Anderson, J. (2019). *Hipersonic and high temperature gas dynamics*. AIAA Education Series. <https://doi.org/10.2514/4.105142>
- Anderson, J. D. (2017). *Fundamentals of Aerodynamics*. McGraw-Hill. <https://bit.ly/35sJobM>
- ANSYS. (2019). *Ansys Fluent 2019 R1: Theory guide*. <https://bit.ly/3jAofBM>
- Arora, R., & Vaidyanathan, R. (2015). Experimental Investigation of Flow Through Planar Double Divergent Nozzles. *Acta Astronautica* 112, 200-216. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.03.020>
- Barato, F., Ghilardi, M., Santi, M., & Pavarin, D. (2016, 25-27 de julio). *Numerical Optimization of Hybrid Sounding Rockets through Coupled Motor-Trajectory Simulation* [sesión de conferencia]. 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Salt Lake City, UT, Estados Unidos. <https://doi.org/10.2514/6.2016-4749>
- Back, L. H., & Cuffel, R. F. (1966). Detection of Oblique Shocks in a Conical Nozzle with a Circular-Arc Throat. *AIAA journal*, 4(12), 2219-2221. <https://doi.org/10.2514/3.3881>
- Blazek, J. (2015). *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-19038-1>
- Canales, J. (2013, 27 de marzo). *Sounding Rocket Program in Perú* [sesión de conferencia]. ARC AIAA SpaceOps 2012 Conference, Estocolmo, Suecia. <https://doi.org/10.2514/6.2012-1275893>
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2019). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill. <https://bit.ly/3kqCBWv>
- Dagaro, M., Peralta, L., Ludueña, G. A., Lorenzon, D., García, J. O., Galeasso, A., & Bustamante, J. (2019). Sobre el diseño y construcción de un túnel de viento supersónico bidimensional. *Revista FCEfyN*, 6(2), 35-40. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEfyN/article/view/24380>
- Ding, H., Wang, C., & Wang, G. (2017). Transient Conjugate Heat Transfer in Critical Flow Nozzle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 104, 930-942. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.021>
- De Gouyon, L. (2020, 9 de abril). *The Birth of the Brazilian Space Program*. Space Legal Issues. <https://bit.ly/31yMt9i>
- De León, P. (2016, 26-30 de septiembre). *The Cóndor Project* [sesión de conferencia]. 67th International Astronautical Congress (IAC), Guadalajara, México. <https://bit.ly/3mfdSVD>
- Giglmaier, M., Quaatz, J. F., Gawehn, T., Gulhan, A., & Adams, N. A. (2014). Numerical and Experimental Investigations of Pseudo-Shock Systems in a Planar Nozzle: Impact of Bypass Mass Flow due to Narrow Gaps. *Shock Waves*, 24, 139-156. <https://doi.org/10.1007/s00193-013-0475-2>
- Heeg, F., Kilzer, L., Seitz, R., & Stoll, E. (2020). Design and Test of a Student Hybrid Rocket Engine with an External Carbon Fiber Composite Structure. *Aerospace*, 7(57), 1-19. <https://doi.org/10.3390/aerospace7050057>
- Huh, J., Ahn, B., Kim, Y., Song, H., Yoon, H., & Kwon, S. (2017). Development of a University-Based Simplified H2O2/PE Hybrid Sounding Rocket at KAIST. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 18(3), 512-521. <https://dx.doi.org/10.5139/IJASS.2017.18.3.512>

- Kostic, O., Stefanovic, Z., & Kostic, I. (2017). Comparative CFD Analyses of a 2D Supersonic Nozzle Flow with Jet Tab and Jet Vane. *Tehnicki Vjesnik*, 24(5), 1335-1347. <https://doi.org/10.17559/TV-20160208145336>
- Lacruz, L., Parco, M. A., Santos, R., Torre, C., Ferreira, J., & Benítez, P. (2016). Análisis experimental de las oscilaciones de presión interna en un motor de combustible sólido para cohete sonda. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 37(2), 81-88. <https://erevistas.saber.ula.ve/index.php/cienciaeingenieria/article/view/7443>
- Nair, P. P., Suryan, A., & Dong, H. (2020). Computational Study on Reducing Flow Asymmetry in Over-Expanded Planar Nozzle by Incorporating Double Divergence. *Aerospace Science and Technology*, 100, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.105790>
- Nilsen, C., Meriam, S., & Meyer S. (2019, 7-11 de enero). *Purdue Liquid Oxygen-Liquid Methane Sounding Rocket* [sesión de conferencia]. AIAA SciTech Forum, San Diego, California, Estados Unidos. <https://doi.org/10.2514/6.2019-0614>
- Menter, F. (1994). Two Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, 32, 1598-1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- Morales, G. A., & Mendoza, L. A. (2017). *Diseño detallado e integración de un sistema de recuperación para el cohete sonda Libertador 1* [Tesis de grado, Fundación Universitaria Los Libertadores, Colombia]. <https://bit.ly/34nq00J>
- Östlund, J., & Muhammed, B. (2005). Supersonic Flow Separation with Application to Rocket Engine Nozzles. *ASME, Applied Mechanics Reviews*, 58, 143-177. <https://doi.org/10.1115/1.1894402>
- Okninski, A., & Wolanski, P. (2015). Development of the Polish Small Sounding Rocket Program. *Acta Astronautica*, 108, 46-56. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.12.001>
- Parco, M. A. (2014). *Análisis experimental de temperaturas en la tobera de un motor de cohete de combustible sólido* [Tesis de maestría, Universidad de Los Andes, Venezuela. Tesis no publicado].
- Sutton, G. P., & Biblarz, O. (2016). *Rocket Propulsion Elements*. John Wiley & Sons. <https://bit.ly/3jocVZa>
- Stark, R., & Génin, C. (2016). Optimization of a Rocket Nozzle Side Load Reduction Device. *Journal of Propulsion and Power*, 32(6), 1395-1402. <https://doi.org/10.2514/1.B35971>
- Shimshi, E., Ben-Dor, G., Levy, A., & Krothapalli, A. (2015). Asymmetric and Unsteady Flow Separation in High Mach Number Planar Nozzles. *IJASAR*, 2(6), 60-80. <https://dx.doi.org/10.19070/2470-4415-150008>
- Schlichting, H., & Klaus, G. (2017). *Boundary-layer Theory*. Springer-Verlag. <https://www.springer.com/gp/book/9783662529171>
- Schüttauf, K., Stamminger, A., & Lappöhn, K. (2017). *The Stern Project-Hands on Rockets Science for University Student*. <https://bit.ly/31Aj52l>
- Schulz, W., Cid, G., & Elaskar, S. (2020). 2015-2020 Academic, Research and Service Report of the Aeronautical Department of the National of Córdoba. *IJMCE*, 2(4), 104-116. <https://bit.ly/31wiPkQ>
- Tolentino, S. L., Ferreira, J., Parco, M. A., Lacruz, L., & Marcano, V. (2017). Simulación numérica del flujo sobre-expandido en la tobera cónica experimental ULA-1A XP. *Revista Universidad, Ciencia y Tecnología*, 21(84), 126-133. <https://www.uct.unexpo.edu.ve/index.php/uct/article/view/803>
- Tolentino, S. L., & Caraballo S. (2017). Simulación numérica del flujo de aire con onda de choque en un difusor transónico. *Revista Universidad, Ciencia y Tecnología*, 21(82), 4-15. <https://www.uct.unexpo.edu.ve/index.php/uct/article/view/784/630>
- Tolentino, S. L. (2019). Evaluation of Turbulence Models for the Air Flow in a Planar Nozzle. *Ingenius*, 22, 25-37. <https://doi.org/10.17163/ings.n22.2019.03>
- Tolentino, S. L. (2020). Evaluación de modelos de turbulencia para el flujo de aire en un difusor transónico. *Revista Politécnica*, 45(1), 25-38. <https://doi.org/10.3333/rp.vol45n1.03>
- Tolentino, S. L., Nakka, R., Caraballo, S., & Mírez, J. (en prensa). Simulación numérica del flujo sub-expandido en la tobera cónica experimental Helios-X. *Ingenius*.

- Vera, M. N., Guglielminotti, C. R., & Moreno, C. D. (2015). La participación de la Argentina en el campo espacial: Panorama histórico y actual. *Ciencia, Docencia y Tecnología*, 26(51), pp. 326-349. <https://www.pcient.uner.edu.ar/cdyt/article/view/89>
- Verma, S., Chidambaranathan, M., & Hadjadj, A. (2018). Analysis of Shock Unsteadiness in a Supersonic Over-Expanded Planar Nozzle. *European Journal of Mechanics/B Fluids*, 68, 55-65. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2017.11.005>.
- Verberne, O., Boiron, A. J., Faenza, M. G., & Haemmerli, B. (2015, 27-29 de julio). *Development of the North Star Sounding Rocket: Getting Ready for the First Demonstration Launch* [sesión de conferencia]. Propulsion and Energy Forum. 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Orlando, FL, Estados Unidos. <https://doi.org/10.2514/6.2015.4045>
- Villanueva, F. M. (2018, 3-10 de marzo). *Sounding Rocket Development Program for Perú* [sesión de conferencia]. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, Estados Unidos. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8396555>
- White, F. (2016). *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill Education. <https://www.mheducation.ca/fluid-mechanics-9780073398273-can-group>
- Zebiri, B., Piquet, A., & Hadjadj, A. (2020). Analysis of Shock-Wave Unsteadiness in Conical Supersonic Nozzle. *Aerospace Science and Technology*, 105, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106060>
- Zucker, R. D., & Biblarz, O. (2019). *Fundamentals of Gas Dynamics*. John Wiley & Sons. <https://bit.ly/34jQEYc>

Evaluación de la influencia del grado de madurez de la gulupa (*Passiflora edulis* Sims) sobre la aceptación sensorial en productos alimenticios

*(Evaluation of the influence of the degree of maturity of gulupa [*Passiflora edulis* Sims] on sensory acceptance in food products)*

Laura Patricia Bermeo Escobar¹

Resumen

La gulupa (*Passiflora edulis* Sims) es una fruta exótica de sabor dulce y ligeramente ácido, aroma agradable y de gran aceptación principalmente en mercados europeos. En Colombia, una parte de las cosechas producidas está conformada por frutos que no cumplen con los estándares de calidad para la exportación, por lo que se destinan para el consumo nacional, y son comercializados a precios muy bajos; por eso, es necesario proponer alternativas para su aprovechamiento y potencial mercado. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la influencia del grado de madurez de gulupa sobre la aceptación sensorial en productos alimenticios. Se elaboraron yogur y barras de cereal endulzados con salsa de gulupa proveniente de frutos con diferentes estados de madurez (T1: 30 %, T2: 50 %, T3: 70 % y T4: 100 %). Estos productos fueron evaluados sensorialmente por un panel de 101 consumidores, de edades entre los 18 y 54 años, por medio de la escala hedónica facial de 5 puntos. Los resultados obtenidos mostraron que el 56.44% de los consumidores mencionaron que les encantó el tratamiento T4 (yogur), y el 51.49% de los consumidores que les gustó el tratamiento T3 (barras de cereal). Lo anterior permite concluir que para el yogur, lo más recomendable es endulzar con frutas maduras, o incluso sobremaduras, mientras que para las barras de cereal lo ideal es usar gulupas con menor estado de maduración (70%).

Palabras clave

Análisis sensorial, barras de cereal, gulupa, yogur.

Abstract

Purple passionfruit (*Passiflora edulis* Sims) is an exotic, sweet and slightly acid flavored fruit with a pleasant aroma. It is also widely accepted in European markets. In Colombia, a part of the yield crop is comprised of fruit that does not meet quality standards for export and is intended for national consumption, and marketed at very low prices. Therefore, it is necessary to propose alternatives for its use and potential market. The aim of this study was to assess the influence of the degree of ripeness for purple passionfruit on the sensory acceptance in food products. Yogurt and cereal bars sweetened with purple passionfruit sauce from fruit with different stages of ripeness (T1: 30 %, T2: 50 %, T3: 70 % and T4: 100 %) were prepared. By a panel of 101 consumers aged 18-54 years old, using a 5-point facial hedonic scale, said products were sensorially assessed. The results obtained showed that 56.44% of consumers preferred T4 treatment (yogurt) and 51.49% of consumers preferred T3 treatment (cereal bars). The above mentioned leads to conclude that, for yogurt preparations, it is best to sweeten with ripe or even overripe fruit, while for cereal bars it is ideal to use purple passionfruit with a lower stage of ripeness (70%).

Keywords

Sensory analysis, cereal bars, purple passion fruit, yogurt.

1 Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). Manizales, Colombia [lbermeo4@misena.edu.co, https://orcid.org/0000-0002-9627-1782]

Introducción

La gulupa (*Passiflora edulis* Sims) es una planta que pertenece a las pasifloráceas y es considerada una fruta exótica. Produce frutos de forma redondeada, con un diámetro aproximado entre 4 y 6 cm, de color verde a morado, dependiendo del grado de maduración (Ocampo & Morales, 2012; Flórez et al., 2012). Se caracteriza por tener una pulpa jugosa de color amarillo a naranja, sabor dulce y ligeramente ácido; y su aroma es agradable y de gran aceptación en el mercado dadas sus características organolépticas y nutricionales (Ghada et al., 2020; Hu et al., 2020; Angulo, 2009; Naranjo, 2016). Esta fruta es rica en vitaminas A, C y B12; es fuente de calcio, fibra, fósforo, hierro, potasio y magnesio, además, contiene proteínas y carbohidratos (Li et al., 2020; Ramos et al., 2018; Correa et al., 2016; Cámara de Comercio de Bogotá, 2015; Ministerio de Agricultura, 2012; Ocampo & Morales, 2012).

De acuerdo con los datos reportados por la Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario de Colombia (AGRONET) (2018, diciembre 26) y la Asociación Hortofrutícola de Colombia (ASOHOFrucOL), en 2018, la producción de gulupa fue de 24 799 toneladas, de las cuales 8 109 toneladas (32.69 %) se exportaron a mercados europeos, entre los que se destacan Países Bajos, Bélgica, Alemania, Reino Unido, Canadá, Italia y Francia (Meneses et al., 2019; Sánchez & Angarita, 2018). Esto representa un aumento del 26 % en el valor de las exportaciones en comparación con el 2017 cuando se exportaron 6 587 toneladas (AGRONET, 2019; ASOHOFrucOL, 2019, julio 31). No obstante, las cifras de exportación hacen referencia a fruta fresca, lo cual indica que a pesar de que hay un incremento en la comercialización de esta fruta en mercados internacionales, aún se siguen vendiendo productos colombianos de excelente calidad, pero sin valor agregado alguno.

Estos datos muestran también que en 2018 quedaron para consumo nacional un total de 16 690 toneladas (67.31 %), representadas en frutos de menor calidad que no cumplen con los parámetros de exportación, tales como el calibre, estado de madurez y daños en la cáscara (Gobernación del Tolima, 2017). Estos fueron comercializados en fresco, lo que ha generado menor rentabilidad para los productores, debido a los bajos precios de venta por kilogramo en el mercado nacional (\$1 000 - \$1 600) (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2019), con respecto al de exportación que fue de \$14 000 por kilo (Asociación Nacional de Comercio Exterior, 2018).

A pesar de los datos mencionados, el cultivo de gulupa tiene un gran potencial de industrialización y aprovechamiento, por lo que investigadores de diferentes partes del mundo han mostrado un interés creciente en esta planta, debido a sus propiedades nutricionales, organolépticas, fitoterapéuticas y usos tradicionales y etnobotánicos; no solo del fruto, sino también de subproductos como la cáscara, semillas, hojas, flores y tallos, pues a partir de estos se obtienen fuentes de moléculas naturales de relevancia para las industrias farmacéuticas, cosméticas y alimentarias (Da Silva et al., 2020; Carvajal et al., 2014; Correa et al., 2016; Ingale & Hivrale, 2010). Por ello, han enfocado gran parte de sus investigaciones al estudio de su composición química y nutricional, a evaluar su actividad fenólica, antioxidante y antimicrobiana, y a la extracción y caracterización de compuestos bioactivos, entre otros (Granados et al., 2017).

En Colombia, esta planta se ha utilizado tradicionalmente en la medicina popular para contrarrestar la tos, tranquilizar y producir sueño, bajar el colesterol, aliviar la hepatitis, las contusiones y los hematomas superficiales, y controlar la presión arterial (Carvajal et al., 2014). No obstante, actualmente se ha encontrado también que los extractos obtenidos a partir de

las cáscaras y la pulpa tienen actividad hepatoprotectora, nefroprotectora y efectos sobre la hipercolesterolemia (Nerdy & Ritarwan, 2019; Grosseli et al., 2014). Se han demostrado propiedades antifatiga de antocianinas purificadas de cáscaras (Hu et al., 2020) y efectos positivos del consumo de productos y subproductos del fruto en personas con enfermedades crónicas no degenerativas (Vasconcelos et al., 2019); así mismo, se ha investigado sobre el potencial antiinflamatorio de las hojas y los extractos de polifenoles para prevenir la inflamación celular (Araújo, 2015; Carmona et al., 2019).

En relación con la cosmética, se encontró que las cáscaras han sido utilizadas para obtener colorantes y usarlos como tinturas naturales (Carvajal et al., 2014); y, en años recientes, se encontraron reportes donde se están utilizando extractos y aceite de semillas en cremas para el tratamiento del acné y para elaborar productos cosméticos con propiedades emolientes, tales como cremas faciales y corporales, jabones, labiales hidratantes, geles de ducha, exfoliantes, champús, aceites esenciales, entre otros (Dewi et al., 2020; Ocampo et al., 2020; Guzmán, 2019). En la parte alimentaria, se han reportado usos comestibles en la elaboración de pulpa, jugos, salsas, postres, mermeladas y dulces, helados, bebidas lácteas y, en ocasiones, la han empleado para la nutrición animal (Ocampo et al., 2020; Carvajal et al., 2014; Guzmán, 2019). En los estudios más recientes se ha evaluado el potencial del epicarpio para producir colorantes y extractos a base de antocianinas con propiedades bioactivas, se ha extraído la pectina grado alimenticio y se ha utilizado la cáscara de gulupa para reemplazar la harina de trigo en carnes de hamburguesa (Ghada et al., 2020; Herrera et al., 2020; Higuera, 2017; López et al., 2016); también se ha demostrado el potencial de la pulpa para elaborar productos nutracéuticos por su elevado contenido de minerales y vitamina C (Granados et al., 2017). Adicionalmente, se ha sugerido que las semillas de la fruta de la pasión (maracuyá y gulupa) son ricas en ácidos grasos insaturados como el ácido oleico y linoleico, por lo que estas frutas podrían ser fuente de aceites comestibles grado *premium* (Ocampo et al., 2020; Liu et al., 2008).

De acuerdo con lo anterior, son relevantes los avances obtenidos en la parte alimentaria, sin embargo, es necesario realizar más estudios que permitan proponer nuevas alternativas para el aprovechamiento integral de este fruto, evaluar su potencial de diversificación en el mercado y, de esta manera, contribuir al mejoramiento de la productividad y competitividad para la agroindustria colombiana. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue evaluar la influencia del grado de madurez de la gulupa (*Passiflora edulis* Sims) sobre la aceptación sensorial en productos alimenticios.

Metodología

Ubicación del sitio del ensayo

El estudio se desarrolló en la planta de agroindustria del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) Regional-Caldas, ubicada en la ciudadela tecnológica Los Cerezos, km 10 vía al Magdalena, Manizales-Caldas, Colombia.

Material vegetal

Los frutos de gulupa (*Passiflora edulis* Sims) fueron cosechados del cultivo establecido en la granja Los Cerezos del SENA Regional-Caldas; estos fueron recolectados y clasificados de acuerdo con los siguientes estados de madurez: 2 (30 %), 3 (50 %), 4 (70 %) y 6 (100 %).

Parámetros fisicoquímicos

Color: el color se determinó visualmente con la ayuda de la tabla de color desarrollada por Pinzón et al., en 2007, (Figura 1), seleccionando frutos con estados de madurez 2, 3, 4 y 6.

Figura 1. Tabla de color de frutos de gulupa (*Passiflora edulis* Sims)



Fuente: Pinzón et al., (2007)

pH: se determinó siguiendo los parámetros establecidos en la Norma Técnica Colombiana NTC 4592 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 1999), utilizando un potenciómetro marca SI Analytics HandyLab 100.

Acidez titulable: se determinó por el método de titulación potenciométrica (AOAC, 2016). El resultado se expresó como porcentaje de ácido cítrico utilizando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Ácido cítrico} = (V1 \times N \times K / V2) \times 100$$

Donde:

V1 = volumen de NaOH consumido (mL)

N = normalidad del NaOH (0.1 meq/mL)

K = peso equivalente del ácido cítrico (0.064 g/meq)

V2 = volumen de la muestra

Sólidos solubles totales (°Brix): se determinaron de acuerdo con el procedimiento establecido en la Norma Técnica Colombiana NTC 4624 (ICONTEC, 1999). El refractómetro utilizado fue un Brixco modelo 3085.

Índice de madurez: se calculó a partir de la relación entre los sólidos solubles totales (°Brix) y la acidez titulable.

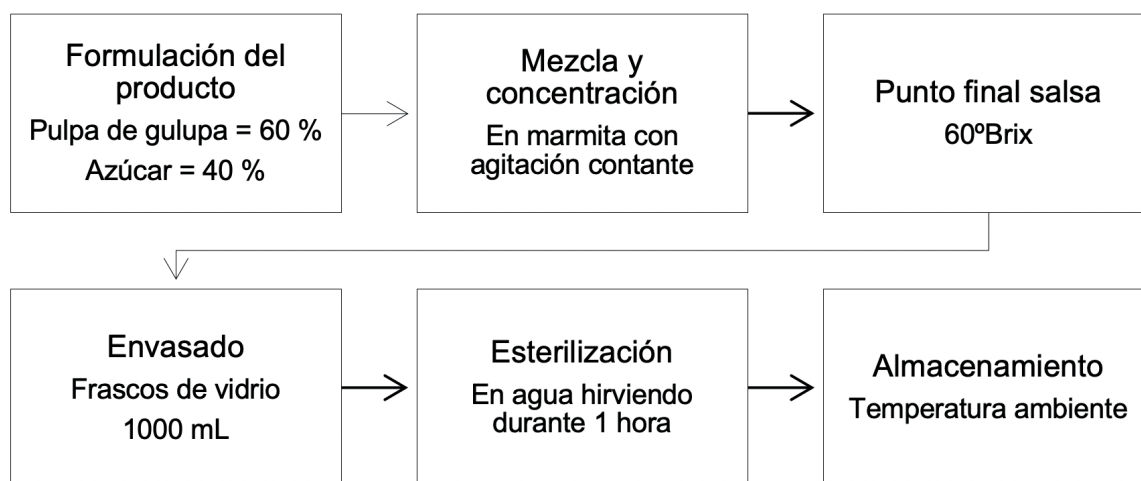
Obtención de la pulpa

Las gulupas utilizadas fueron clasificadas con base en su estado de madurez (2, 3, 4 y 6). Solo se utilizaron frutos que se encontraban en buen estado físico, es decir, libres de hongos, cortes o fisuras profundas y pudrición. Posteriormente, se lavaron y desinfectaron en una solución de hipoclorito de sodio a 50 ppm durante 10 minutos y se enjuagaron con agua potable. Finalmente, las gulupas se cortaron por la mitad retirando la pulpa con una cuchara. La pulpa se introdujo en una despulpadora para retirarle las semillas. Este proceso se repitió tres veces para mejorar el rendimiento.

Elaboración de salsa de gulupa

La salsa se elaboró siguiendo el procedimiento que se muestra a continuación (Figura 2):

Figura 2. Diagrama de flujo elaboración salsa de gulupa



Elaboración de yogur de gulupa

La elaboración del yogur se llevó a cabo siguiendo el procedimiento establecido en la planta de agroindustria del SENA Regional-Caldas. En una olla de acero inoxidable se vertió leche entera pasteurizada (100 %) a la cual se añadió 7 % de azúcar para mejorar el sabor final del yogur. Esta mezcla se calentó hasta una temperatura de 45 °C, seguidamente fue inoculada con 3 % de cultivo láctico comercial (CHOOZIT MY 800 LYO 5 DCU), compuesto por cepas de *Streptococcus thermophilus*, *Lactobacillus delbrueckii subsp. lactis* y *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* y se dejó en incubación durante 12 horas a temperatura ambiente (25 °C) hasta llegar a un pH de 4.6. Una vez obtenido el yogur, este se homogenizó y endulzó con 13 % de salsa de gulupa. Posteriormente, se envasó en frascos plásticos de 1 000 mL y se llevó a refrigeración (4 °C).

Elaboración de barras de cereal endulzadas con salsa de gulupa

Para este producto se utilizaron frutos secos como maní triturado, coco deshidratado, uvas pasas, ajonjolí, almendras laminadas, arándanos deshidratados, avena en hojuelas, chíá, quinua y arroz so-

plado, en una proporción de 60 %, y 40 % de jarabe compactante compuesto por miel (47.45 %), margarina vegetal (5.1 %) y salsa de gulupa (47.45 %). Los frutos secos se mezclaron en un recipiente metálico y fueron llevados a fuego medio hasta que estuvieron dorados. Aparte se preparó el jarabe compactante llevándolo a cocción hasta una temperatura de 112 °C. Posteriormente, se añadieron los frutos secos al jarabe mezclando hasta homogenizar. Finalmente, la mezcla fue llevada a una bandeja antiadherente en la que se moldeó en forma de barras y se empacaron en papel cristaflex.

Evaluación sensorial

La evaluación sensorial fue realizada por un panel de 101 consumidores (53 hombres y 48 mujeres) conformada por instructores, aprendices y personal administrativo del SENA Regional-Caldas, de edades entre los 18 y 54 años. Los consumidores evaluaron el sabor de los productos (yogur y barras) utilizando la escala hedónica facial de 5 puntos (Anzaldúa-Morales, 1994), que se muestra en la Figura 3. Se eligió esta escala, debido a que estas personas no tenían ningún conocimiento acerca de los análisis sensoriales, facilitando así la correcta ejecución de las pruebas en un corto tiempo.

Figura 3. Escala hedónica facial de 5 puntos. Fuente: Anzaldúa-Morales, (1994)



Las muestras de yogur fueron presentadas a los evaluadores en copas plásticas de ½ onza, y las barras en porciones de 10 gramos cada una. Se entregaron ocho muestras a cada evaluador.

Análisis estadístico

Los datos fueron analizados mediante análisis normal de varianza (ANOVA) con el fin de establecer diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre las muestras analizadas. También se empleó la prueba de comparación múltiple (LSD) para determinar cuáles promedios fueron significativamente diferentes de otros. Para tal fin se utilizó el programa de cómputo INFOSTAT (versión libre para Windows).

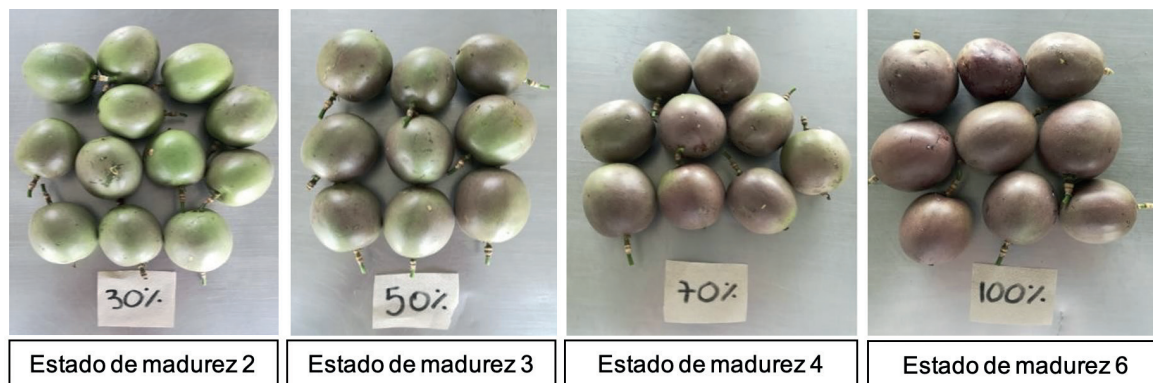
3. Resultados y discusión

Características fisicoquímicas

De acuerdo con la Figura 4, las gulupas con estado de madurez 2 correspondieron a frutos con un color verde entre 70-80 % y 20-30 % de color morado; los de estado de madurez 3, con un color verde entre 40-50 % y 40-50 % de color morado; los de estado de madurez 4, con un color verde

entre 30-5 % y 70-95 % de color morado, y los de estado de madurez 6, con un color 100 % morado oscuro, con presencia de brillo y a veces arrugas, tal como lo describieron Pinzón et al., (2007).

Figura 4. Clasificación de la gulupa según su estado de madurez



En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica realizada a la gulupa en los diferentes estados de madurez evaluados. Para esto se tomaron los promedios de las variables analizadas. Como se puede apreciar, el pH de los frutos se mantuvo prácticamente constante, pues pasó de un valor de 2.88 (30 % madurez) a uno de 2.93 (100 % madurez), variación que no es significativa (0.05). Estos resultados concuerdan con los reportados por Franco et al., (2014) y Jiménez (2010) en gulupa; así como los mencionados por Menéndez et al. (2006), en maracuyá amarillo, quienes aseguraron que este comportamiento en el pH se debe a la presencia de un sistema de autorregulación, que podría ser el resultado de un efecto amortiguador del ácido cítrico, que tiende a convertirse en la sal correspondiente manteniendo constante el valor del pH.

Respecto a los sólidos solubles totales ($^{\circ}$ Brix), se puede observar que entre más verde era la fruta, menos concentración de azúcares contenía y viceversa. Esto se debe a que durante el proceso de madurez de una fruta, los almidones presentes al inicio de esta se van degradando y convirtiéndose en azúcares simples y aumenta así su concentración al final de la maduración (Jiménez et al., 2011; Shiomi et al., 1996). Los resultados obtenidos en este estudio fueron de 11.65 $^{\circ}$ Brix y 12.65 $^{\circ}$ Brix en los estados de madurez 30 % y 100 %, respectivamente, datos similares a los reportados por Flórez et al. (2012), quienes reportaron valores de 12.1 a 12.6 $^{\circ}$ Brix en frutos de gulupa recién cosechados en los mismos estados de madurez.

La acidez titulable de la gulupa fue mayor cuando el fruto estaba más verde (30 % de madurez) que cuando alcanzó su máximo grado de maduración (100 % de madurez), pues presentó valores de 4.51 % y 3.33 % de ácido cítrico, respectivamente. Estos porcentajes son semejantes a los mencionados por Flórez et al. (2012), quienes reportaron valores de 4.60 % y 3.64 % de ácido cítrico en frutos de gulupa recién cosechados con estados de madurez 30 % y 100 %, respectivamente. Estos resultados reflejan que hay menor presencia de ácidos orgánicos como el cítrico al final de la madurez, debido al consumo de estos ácidos utilizados en la respiración de la fruta y, por tanto, su participación en la ruta de los ácidos tricarbónicos que indican una alta tasa metabólica (Jiménez et al., 2011; Flórez et al., 2012), lo que causa que el sabor de la fruta se haga más dulce, tal y como lo mencionaron Orjuela et al. (2011) en su estudio sobre caracterización fisicoquímica de frutos de gulupa. Estos resultados también son coherentes

con los obtenidos por Pinzón et al. (2007), quienes indicaron que la acidez titulable en gulupa disminuye a medida que la fruta madura.

Con relación al índice de madurez que refleja el balance entre los azúcares y los ácidos que dan el sabor característico del fruto, se observa que este índice aumentó con el grado de maduración, ya que para el estado de madurez 2 (30 %) fue de 2.58, mientras que para el estado de madurez 6 (100 %) fue de 3.79, resultados similares a los obtenidos por Flórez et al. (2012), quienes obtuvieron valores de 2.62 y 3.45, respectivamente. Estos datos también concuerdan con los obtenidos por Pinzón et al. (2007), quienes mencionaron que el índice de madurez de la gulupa se incrementa cuando la fruta es más madura.

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica de la gulupa

Estado de madurez	pH	σ pH	°Brix	σ °Brix	Acidez titulable	σ AT	Índice de madurez	σ IM
2 (30 %)	2.88	0.0834	11.65	1.052	4.51	0.3309	2.58	0.2954
3 (50 %)	2.89	0.0885	12.00	1.7224	4.50	0.1835	2.67	0.3962
4 (70 %)	2.90	0.0632	12.63	1.3792	4.47	0.5039	2.82	0.4155
6 (100 %)	2.93	0.0931	12.65	1.6533	3.33	0.3768	3.79	0.708

Nota: σ = Desviación estándar; AT= Acidez titulable; IM = Índice de madurez

Evaluación sensorial

Para el análisis estadístico de los datos, se tomaron como factores experimentales (independientes) yogur y barras de cereal endulzados con salsa de gulupa a diferentes estados de madurez, estos a su vez con cuatro niveles: salsa de gulupa al 30 %, 50 %, 70 % y 100 % de madurez.

Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) obtenidos a partir del análisis sensorial de yogur indican que se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados (T1: yogur endulzado con salsa de gulupa al 30 % de madurez; T2: yogur endulzado con salsa de gulupa al 50 % de madurez; T3: yogur endulzado con salsa de gulupa al 70 % de madurez, y T4: yogur endulzado con salsa de gulupa al 100 % de madurez), ya que el P-Valor obtenido (0.0000) fue <0.05 . Así mismo, el valor de F-Real (15.35) fue >2.456 (F-Crítico obtenido de las tablas), esto con un nivel del 95 % de confianza.

Para determinar cuáles tratamientos fueron significativamente diferentes de otros, se aplicó la prueba de comparación múltiple (LSD). En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 2. Prueba de comparación múltiple (LSD) para el análisis sensorial de yogur

Tratamientos	Casos	Media	Grupos Homogéneos
T1	101	3.50496	X
T2	101	3.65347	XX
T3	101	3.81188	X
T4	101	4.38614	X

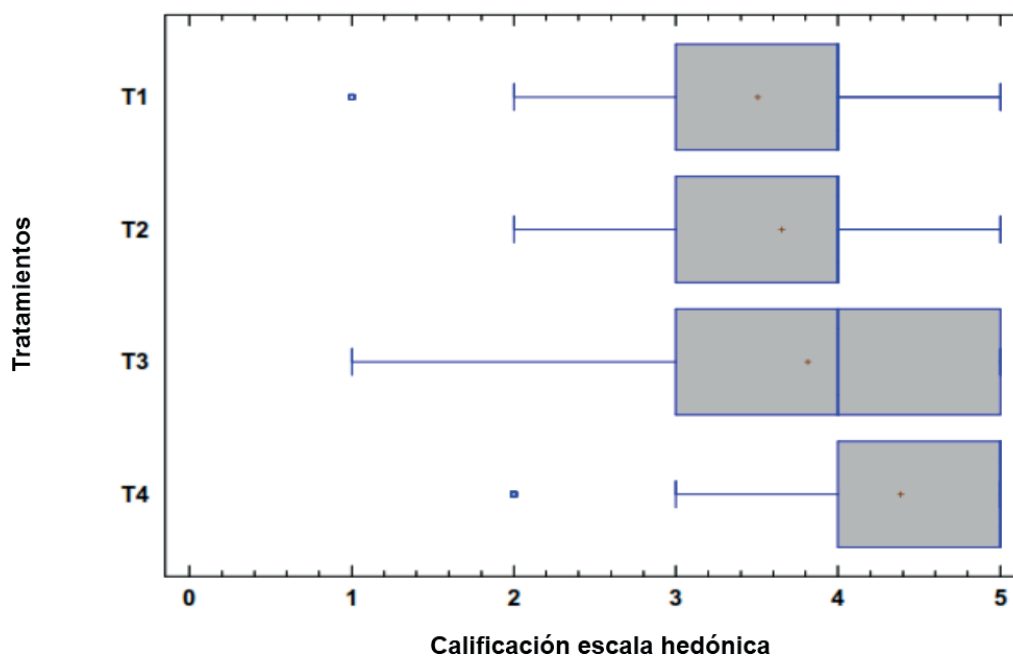
En esta tabla, se puede apreciar que entre los tratamientos T1-T2 y T2-T3 no se presentaron diferencias significativas con un nivel del 95 % de confianza, lo que indica que la variable sabor no fue afectada por estos tratamientos, ya que recibieron por parte de los evaluadores

calificaciones similares en la escala hedónica facial. Por lo tanto, se podrían utilizar frutas en cualquiera de estos estados de madurez para endulzar el producto, y los consumidores no detectarían cambios significativos en su sabor, lo cual permite aprovechar los frutos menos maduros para su industrialización.

No obstante, entre los tratamientos T1-T3, T1-T4, T2-T4 y T3-T4 sí se presentaron diferencias significativas con un nivel del 95 % de confianza. Estos resultados indican que esos tratamientos afectaron la variable sabor, puesto que los evaluadores fueron capaces de detectar sensorialmente diferencias en este parámetro, lo cual podría influir sobre la decisión de compra del producto si estuviese en el mercado.

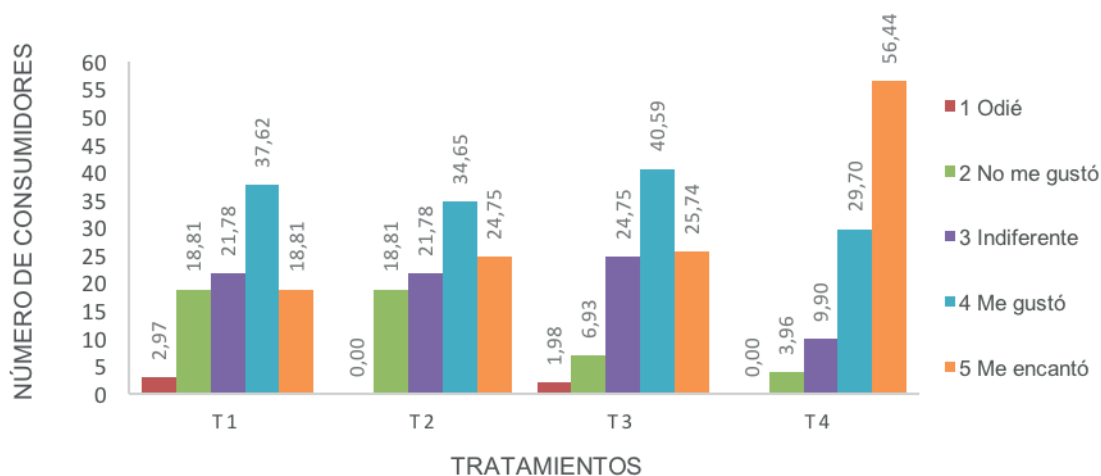
En la Figura 5 se pueden observar de manera gráfica los resultados obtenidos en la prueba de comparación múltiple:

Figura 5. Gráfico de cajas y bigotes obtenido del análisis sensorial del yogur



Respecto al grado de aceptación del yogur, en la Figura 6 se puede observar que el tratamiento que obtuvo la mayor calificación en la escala hedónica facial (5: me encantó) por parte de los evaluadores fue el tratamiento T4 con un 56.44 %, que correspondió al yogur endulzado con salsa de gulupa elaborada con frutas maduras o hasta sobremaduras (100 % madurez). Estos resultados demuestran que esos frutos pueden ser utilizados para elaborar este tipo de productos, convirtiéndose en una buena opción para que los productores de gulupa puedan darles un mayor aprovechamiento y valor agregado, ya que normalmente son comercializados a bajos precios en el mercado.

Figura 6. Análisis sensorial del yogur



El porcentaje de evaluadores que calificaron los tratamientos T3, T1, T2 y T4 con un valor de 4 (carita: me gustó) en la escala hedónica fue de 40.59 %, 37.62 %, 34.65 % y 29.70 %, respectivamente, lo cual indica que, independientemente del estado de madurez de la fruta con la cual fue endulzado el yogur, a los evaluadores les agradó el producto y podrían ser consumidores potenciales si fuese lanzado al mercado. No obstante, sería fundamental ajustar los aspectos técnicos del producto para mejorar la percepción de los consumidores.

De acuerdo con lo anterior, se evidenció que, en términos generales, el tratamiento T4 fue el que más gustó entre los consumidores, y el tratamiento T1 el que menos, esto se debe a la acidez del producto según las observaciones reportadas en la encuesta.

Aparte, los resultados del análisis de varianza (ANOVA) obtenidos a partir del análisis sensorial de las barras de cereal indican que no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados (T1: barras endulzadas con salsa de gulupa al 30 % de madurez; T2: barras endulzadas con salsa de gulupa al 50 % de madurez; T3: barras endulzadas con salsa de gulupa al 70 % de madurez, y T4: barras endulzadas con salsa de gulupa al 100 % de madurez), ya que el P-Valor (0.9705) fue >0.05 . De la misma manera, el valor de F-Real (0.08) fue <2.456 (F-Crítico, obtenido de las tablas), esto con un nivel del 95 % de confianza.

Para corroborar que no hubo tratamientos significativamente diferentes de otros, se aplicó la prueba de comparación múltiple (LSD). En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 3. Prueba de comparación múltiple (LSD) para el análisis sensorial de barras de cereal

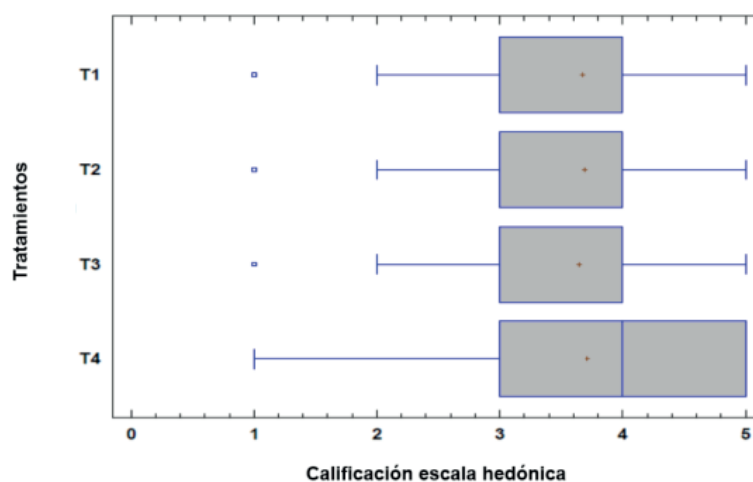
Tratamientos	Casos	Media	Grupos Homogéneos
T3	101	3.64356	X
T1	101	3.67327	X
T2	101	3.69307	X
T4	101	3.71287	X

En la Tabla 3 se puede apreciar que no se presentaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos, esto con un nivel del 95 % de confianza, lo que indica que la variable sabor no fue afectada por los tratamientos evaluados, ya que los evaluadores, en la escala hedónica facial, les asignaron calificaciones. Asimismo, se puede afirmar que independientemente

te de la salsa que se utilice para endulzar las barras de cereal los consumidores no detectaron diferencias en este producto.

En la Figura 7 se pueden observar, de manera gráfica, los resultados obtenidos en la prueba de comparación múltiple:

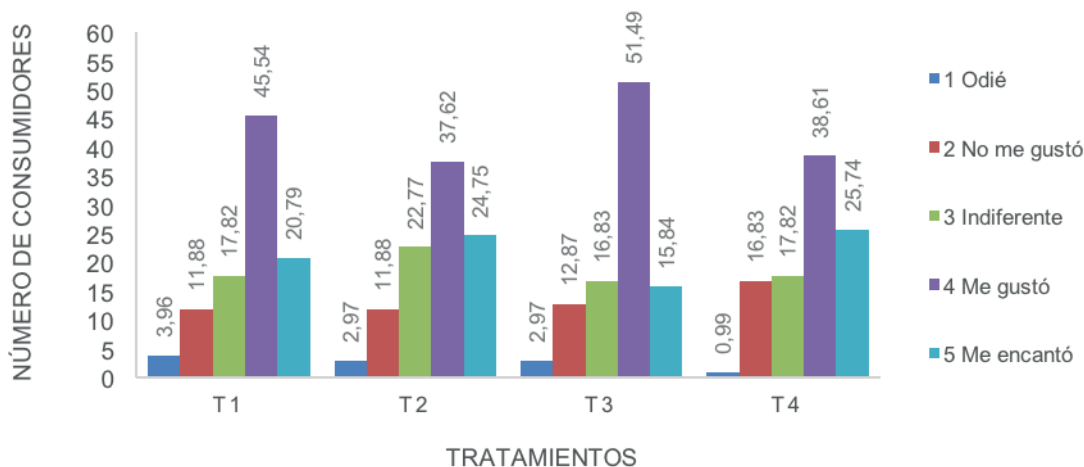
Figura 7. Gráfico de cajas y bigotes obtenido del análisis sensorial de barras de cereal



Referente al grado de aceptación de las barras de cereal, en la Figura 8 se pueden apreciar los promedios de calificaciones que cada tratamiento evaluado obtuvo de los consumidores que hicieron la prueba. Se observa que el tratamiento T3 fue el que recibió la mayor calificación en la escala hedónica facial (4: me gustó) con un 51.49 % de los evaluadores, seguido por los tratamientos T1, T4 y T2 con porcentajes de 45.54 %, 38.61 % y 37.62 %, respectivamente. Estos resultados demuestran que todos los tratamientos evaluados fueron aceptados por los evaluadores, y que se podrían utilizar gulupas en cualquier estado de madurez para endulzar el producto, lo cual permite aprovechar los frutos en cualquier estado de maduración para su industrialización. No obstante, sería necesario mejorar algunas características del producto para lograr una mayor aceptación en el mercado.

Los resultados obtenidos en este estudio respecto a la aceptación sensorial de productos alimenticios elaborados a base de gulupa demuestran que esta fruta tiene un gran potencial de diversificación e industrialización en Colombia. Estos resultados son coherentes con los reportados por Parra (2012), quien desarrolló una compota a base de gulupa, estevia y almidón de sagú, y encontró que el 65 % de los jueces que evaluaron sensorialmente la compota mencionaron que les gustó el producto por su intenso sabor a gulupa. Así mismo, según los resultados obtenidos por Serpa et al., (2015) los panelistas mostraron una aceptación sensorial del 100 % sobre las características de sabor, olor y aroma de un refresco elaborado a partir de fresa, mora, gulupa y uchuva. De modo similar, en 2014, Carvajal et al. evaluaron las propiedades funcionales y nutricionales de seis especies de pasifloras en el departamento del Huila-Colombia, donde encontraron que para gulupa se reportaron 14 diferentes usos de esta fruta, dentro de los cuales se destacó la elaboración de productos alimenticios como pulpa, jugos, tortas, salsas, dulces, mermeladas, aromáticas, aderezo para carnes y productos lácteos —como yogur, postres, helados, entre otros—, lo que confirma la gran aceptación que tiene este fruto en diferentes presentaciones, debido a su agradable sabor agridulce y alto valor nutricional.

Figura 8. Análisis sensorial de barras de cereal



Conclusiones y recomendaciones

Respecto a las características fisicoquímicas analizadas en frutos de gulupa, se pudo determinar que el valor de pH se mantuvo prácticamente constante en los estados de madurez evaluados (30 %, 50 %, 70 % y 100 %), mientras que la acidez disminuyó a medida que la fruta era más madura. Así mismo, características como los sólidos solubles totales e índice de madurez presentaron un aumento gradual en relación con la maduración de la fruta.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis sensorial de los productos evaluados, se puede decir que el 56.44 % de los consumidores prefirieron el yogur cuando fue endulzado con salsa de gulupas maduras o hasta sobremaduras, mientras que para las barras de cereal el 51.49 % de los consumidores las prefirieron cuando fueron endulzadas con salsa de gulupa al 70 % de maduración. Lo anterior permite demostrar que existen diversas alternativas para aprovechar los frutos de gulupa que no cumplan con los parámetros de exportación (estado de madurez, calibre y daños en la cáscara), en su mayoría comercializados a bajos precios, para generar productos con valor agregado y de gran aceptación en el mercado.

A partir de la gulupa (*Passiflora edulis* Sims) se pueden desarrollar numerosos productos alimenticios, cosméticos y hasta medicinales gracias a sus características organolépticas y nutricionales. De igual manera, se pueden aprovechar los subproductos como cáscaras, semillas, flores y hojas para obtener compuestos de interés industrial. No obstante, es necesario desarrollar más investigaciones sobre esta fruta que permitan explotar todo su potencial.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por el Sistema de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación del SENA-SENNOVA, Regional Caldas y la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, y fue financiado con recursos del Fondo Regional de Tecnología Agroalimentaria (FONTAGRO) mediante el proyecto "Productividad y Competitividad Frutícola Andina".

Referencias

- Angulo, R. (2009). *Gulupa Passiflora edulis var. edulis* Sims. Bayer CropScience S. A. <https://bit.ly/370jW3s>
- Anzaldúa-Morales, A. (1994). *La evaluación sensorial de los alimentos en la teoría y la práctica*. Acribia.
- Araújo, C. L. A. (2015). *Avaliação do potencial anti-inflamatório das folhas de Passiflora edulis Sims e de seus efeitos sobre o metabolismo oxidativo de neutrófilos peritoneais de ratos*. [Tesis de maestría, Universidad Federal de Alfenas]. Biblioteca Digital de Teses e Dissertação. <https://bdt.unifal-mg.edu.br:8443/handle/tede/778>
- Asociación Hortofrutícola de Colombia. (2019, julio 31). *Balance del sector hortofruticultura en 2018*. <https://bit.ly/2Ts9Mx8>
- Asociación Nacional de Comercio Exterior. (2018). *Exportación de gulupa enero-agosto 2018*. <https://www.analdex.org/2018/11/08/exportacion-de-gulupa-enero-agosto-de-2018/>
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2015). *Manual gulupa: Programa de apoyo agrícola y agroindustrial. Vicepresidencia de Fortalecimiento Empresarial*. Cámara de Comercio de Bogotá. <https://bit.ly/2TtTj8>
- Carmona, J. C., Taborda, G., Valdez, J. C., Bolling, B. W., & González, C. H. (2019). Polyphenol Extracts from Three Colombian Passifloras (Passion Fruits) Prevent Inflammation-Induced Barrier Dysfunction of Caco-2 Cells. *Molecules*, 24(24), 4614. <https://doi.org/10.3390/molecules24244614>
- Carvajal, L. M., Turbay, S., Álvarez, L. M., Rodríguez, A., Álvarez, M., Bonilla, K., Restrepo, S., & Parra, M. (2014). Propiedades funcionales y nutricionales de seis especies de *Passiflora* (Passifloraceae) del departamento del Huila, Colombia. *Caldasias*, 36(1), 1-15. <http://dx.doi.org/10.15446/caldasias.v36n1.21243>
- Correa, R., Peralta, R. M., Haminiuk, C. W., Maciel, G. M., Bracht, A., & Ferreira, I. (2016). The Past Decade Findings Related with Nutritional Composition, Bioactive Molecules and Biotechnological Applications of *Passiflora* spp. (passion fruit). *Trends in Food Science & Technology*, 58, 79-95. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.10.006>
- Da Silva, D., Lopes, A. P., Segatto, M. L., Stahl, A. M., & Gomes, V. (2020). Development and Application of Green and Sustainable Analytical Methods for Flavonoid Extraction from *Passiflora* Waste. *BMC Chemistry*, 14(1), 56. <https://doi.org/10.1186/s13065-020-00710-5>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (4 de enero de 2019). *Boletín Semanal: Precios mayoristas*. <https://bit.ly/3kAh4dT>
- Dewi, N. K., Putra, I. B., & Jusuf, N. K. (2020). Passion Fruit Purple Variant (*Passiflora edulis* Sims var. *edulis*) Seeds Extract 10 % Cream in Acne Vulgaris Treatment: An Open-Label Pilot Study. *International Journal of Dermatology*. <https://doi.org/10.1111/ijd.15178>
- Flórez, L. M., Pérez, L. V., Melgarejo, L. M., & Hernández, M. S. (2012). Caracterización fisicoquímica, fisiológica y bioquímica del fruto de gulupa (*Passiflora edulis* Sims) como indicadores para el punto óptimo de cosecha. En L. M. Melgarejo (Ed.), *Ecofisiología del cultivo de la gulupa (Passiflora edulis Sims)* (pp. 53-79). Universidad Nacional de Colombia.
- Franco, G., Cartagena, J. R., & Correa, G. (2014). Análisis de crecimiento del fruto de gulupa (*Passiflora edulis* Sims), en las condiciones ecológicas del bosque húmedo montano bajo de Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 17(2), 391-400. <https://doi.org/10.31910/rudca.v17.n2.2014.242>
- Ghada, B., Pereira, E., Pinela, J., Prieto, M. A., Pereira, C., Calhelha, R. C., Stojković, D., Soković, M., Zaghdoudi, K., Barros, L., & Ferreira, I. (2020). Recovery of Anthocyanins from Passion Fruit Epicarp for Food Colorants: Extraction Process Optimization and Evaluation of Bioactive Properties. *Molecules*, 25(14), 3203. <https://doi.org/10.3390/molecules25143203>
- Granados, C., Tinoco, K. P., Granados, E., Pájaro, N. P., & García, Y. (2017). Caracterización química y evaluación de la actividad antioxidante de la pulpa de *Passiflora edulis* Sims (gulupa). *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 22(2), s. p. <https://bit.ly/3kCUOLH>

- Gobernación del Tolima. (2017). *Protocolo de buenas prácticas para poscosecha de gulupa (Passiflora edulis Sims)*. Logihfrutic: Convenio 1032-2013 (Universidad de Ibagué). <https://bit.ly/3e5eha9>
- Grosseli, M. M., Moraes, M. B., Damaceno, B. F., Okawabata, F. S., Tardivo, A. C., Alves, & M. J. (2014). Uso da polpa e da casca do maracujá (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*) sobre o colesterol em coelhos com hipercolesterolemia experimental. *Revista de Pesquisa e Inovação Farmacêutica*, 6(2), 12-20. <http://hdl.handle.net/11449/140828>
- Guzmán, C. (2019) *Evaluación del aceite fijo de semillas de Gulupa (Passiflora edulis var. edulis) como ingrediente funcional emoliente en nanoemulsiones de uso tópico* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UN. <http://bdigital.unal.edu.co/73751/>
- Herrera, J., Meneses, N., & Tarazona, M. P. (2020). Optimizing the Extraction of Anthocyanins from Purple Passion Fruit Peel Using Response Surface Methodology. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14, 185-193. <https://bit.ly/34zoVmL>
- Higuera, M. C. (2017). *Aprovechamiento de la cáscara de gulupa como fuente de pectina para la industria alimentaria* [Tesis de pregrado, Universidad de la Salle]. Ciencia Unisalle. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_alimentos/53
- Hu, M., Du, J., Du, L., Luo, Q., & Xiong, J. (2020). Anti-Fatigue Activity of Purified Anthocyanins Prepared from Purple Passion Fruit (*P. edulis Sim*) Epicarp in Mice. *Journal of Functional Foods*, 65, 103725. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103725>
- Ingale, A. G., & Hivrale, A. U. (2010). Pharmacological Studies of Passiflora sp. and Their Bioactive Compounds. *African Journal of Plant Science*, 4(10), 417-426. <http://www.academicjournals.org/ajps>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1999). *Norma Técnica Colombiana NTC 4592. Productos de frutas y verduras. Determinación del pH*. ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1999). *Norma Técnica Colombiana NTC 4624. Jugos de frutas y hortalizas. Determinación del contenido de sólidos solubles. Método refractométrico*. ICONTEC.
- Jiménez, A. M. (2010). *Estudio de los cambios físicos y químicos de la gulupa (Passiflora edulis Sims fo. edulis) durante la maduración* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UN. <http://bdigital.unal.edu.co/3997/1/197493.2011.pdf>
- Jiménez, A. M., Sierra, C. A., Rodríguez, F. J., González, M. L., Heredia, F. J., & Osorio, C. (2011). Physicochemical Characterisation of Gulupa (*Passiflora edulis* Sims. f. *edulis*) Fruit from Colombia during the Ripening. *Food Research International*, 44(7), 1912-1918. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.11.007>
- Latimer Jr., G. W. (Ed.). (2016). *Official Methods of Analysis of AOAC International* (20.^a ed.). Association of Official Analytical Chemists.
- Li, C., Xin, M., Li, L., He, X., Liu, G., Li, J., Sheng, J., & Sun, J. (2020). Transcriptome Profiling Helps to Elucidate the Mechanisms of Ripening and Epidermal Senescence in Passion Fruit (*Passiflora edulia Sims*). *Plos One*, 5(9), s. p. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236535>
- Liu, S., Yang, F., Li, J., Zhang, C., Ji, H., & Hong, P. (2008). Physical and chemical analysis of Passiflora seeds and seed oil from China. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 59(7-8), 706-715. <https://doi.org/10.1080/09637480801931128>
- López, L. M., Botero, J., & Arias, F. (2016). *Obtención y evaluación físicoquímica de la harina de cáscara de gulupa (Passiflora edulis Sims. Fo edulis) para su uso en carnes de hamburguesa*. Publitec. http://www.publitech.com.ar/system/noticias.php?id_prod=795
- Menéndez, O., Evangelista, S., Arenas, M., Bermúdez, K., Martínez, A. V., & Jiménez, A. (2006). Cambios en la actividad de α -amilasa, pectinmetilestrasa y poligalacturonasa durante la maduración del maracuyá amarillo (*Passiflora edulis* var. *flavicarpa* Degener). *Interciencia*, 31(10), 728-733. <https://bit.ly/2HJvyKl>

- Meneses, N. A.; Herrera, E. J., & Tarazona, M. P. (2019). Caracterización y estabilidad de un extracto rico en antocianinas a partir de corteza de gulupa. *Revista Colombiana de Química*, 48(2), 27-32. <http://dx.doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v48n2.76682>
- Ministerio de Agricultura. (2012). *Acuerdo de competitividad para la cadena productiva de pasifloras en Colombia*. <https://bit.ly/3moB180>
- Naranjo, J. I. (2016). *Evaluación de dos métodos para la obtención de extractos con actividad antioxidante a partir de gulupa (Passiflora edulis Sims) con aplicación en productos mínimamente procesados* [Tesis de pregrado, Universidad de La Salle]. Ciencia Unisalle. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_alimentos/58
- Nerdy, N., & Ritarwan, K. (2019). Hepatoprotective Activity and Nephroprotective Activity of Peel Extract from Three Varieties of the Passion Fruit (*Passiflora* Sp.) in the Albino Rat. *Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences*, 7(4), 536-542. <https://doi.org/10.3889/oamjms.2019.153>
- Ocampo, J., & Morales, G. (2012). Aspectos generales de la Gulupa (*Passiflora edulis f. edulis* Sims). En J. Ocampo, & K. Wyckhuys (Eds.), *Tecnología para el cultivo de la gulupa en Colombia (Passiflora edulis f. edulis Sims)* (pp. 7-13). Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- Ocampo, J., Rodríguez, A., & Parra, M. (2020). Gulupa: *Passiflora edulis f. edulis* Sims. En A. Rodríguez, F. Gelape, M. Parra, & A. M. Costa (Eds.), *Pasifloras. Especies cultivadas en el mundo* (pp. 139-157). ProImpress.
- Orjuela, N. M., Moreno, L., Hernández, M. S., & Melgarejo, L. M. (2011). Caracterización fisicoquímica de frutos de gulupa (*Passiflora edulis* Sims) bajo condiciones de almacenamiento. En L. M. Melgarejo, & M. S. Hernández (Eds.), *Poscosecha de la gulupa (Passiflora edulis Sims)* (pp.33-44). Universidad Nacional de Colombia.
- Parra, R. (2012). Caracterización fisicoquímica y sensorial de una compota a partir de gulupa (*Passiflora edulis*) almidón de sagú (*Canna edulis*) y stevia. *Vitae*, 19(1), 219-221. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169823914064>
- Pinzón, M. P., Fischer, G., & Corredor, G. (2007). Determinación de los estados de madurez del fruto de la gulupa (*Passiflora edulis* Sims). *Agronomía Colombiana*, 25(1), 83-95. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/14408>
- Ramos, L. C., Pesamosca, E. M., Salvador, M., Hickmann, S., & Oliveira, A. (2018). Antioxidant Potential and Physicochemical Characterization of Yellow, Purple and Orange Passion Fruit. *Journal of Food Science and Technology*, 55, 2679-2691. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3190-2>
- Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario de Colombia. (2018, diciembre 26). *Reporte: Área, producción y rendimiento nacional por cultivo*. <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>
- Sánchez, N. S., & Angarita, V. J. (2018). *Estudio de factibilidad para la creación de una planta procesadora de jugo de gulupa en la ciudad de Cúcuta Norte de Santander* [Tesis de pregrado, Universidad Libre]. Repositorio UniLibre. <http://hdl.handle.net/10901/11986>
- Shiomi, S., Wamocho, S., Agong, S. G. (1996). Ripening Characteristics of Purple Passion Fruit on and off the Vine. *Postharvest Biology and Technology*, 7(1-2), 161-170. [https://doi.org/10.1016/0925-5214\(95\)00023-2](https://doi.org/10.1016/0925-5214(95)00023-2)
- Serpa, A. M., Barajas, J. A., Velásquez, J. A., Vélez, L. M., & Zuluaga, R. (2015). Desarrollo de un refresco a partir de la mezcla de fresa (*Fragaria ananassa*), mora (*Rubus glaucus*), gulupa (*Passiflora edulis* Sims) y uchuva (*Physalis peruviana* L.) fortificado con hierro y dirigida a niños en edad pre-escolar. *Perspectivas en nutrición humana*, 17(2), 151-163. <http://dx.doi.org/10.17533/udea.penh.v17n2a05>
- Vasconcelos, O., Santos, E. L., Dias, S., Correa, L. R., Lopes, D. M., Da Costa, A. C., Furtado, D., & Alves, F. C. (2019). Efeitos do Consumo de Produtos e Subprodutos do Maracujá (*Passiflora edulis*) nas Doenças Crônicas não Degenerativas. *Brazilian Journal of Health Review*, 2(6), 6226-6244. <https://doi.org/10.34119/bjhrv2n6-116>

Autoconfiguration with Global Addresses Using IEEE 802.15.4 Standard in Multi-hop Networks

(Autoconfiguración con direcciones globales usando el estándar IEEE 802.15.4 en redes multisalto)

Carlos Egas Acosta¹, David Cali², Cristian Espinosa³

Abstract

Wireless sensor networks continue to attract a lot of attention from academia and industry promoting large-scale deployments in applications related to the Internet of Things (IoT). Unfortunately, a network containing a large number of sensor nodes also leads to difficulty in the configuring process and assignment of identifiers to nodes. Various approaches have been proposed to solve problems of auto-configuration in Wireless sensor networks, however, still, there are some issues remaining related to automatic assign identifiers A cluster-based hierarchical global address allocation scheme is proposed for a wireless sensor network. The proposal uses the IEEE 802.15.4 protocol and aims to reduce the latency of the identifier assignments and reduce the network level processes to be performed at the node. The address allocation process assigns each node a unique global address, which allows the node to have end-to-end connectivity without network-level involvement. The scenario of adding new nodes to the network or nodes that leave it is contemplated. Finally, the proposed scheme is evaluated experimentally, verifying the correct operation of the algorithm proposed in the implemented prototype.

Keywords

Link level, global address, sensors, cluster, configuration, networks.

Resumen

Las redes de sensores inalámbricos continúan atrayendo la atención de la academia y la industria que promueven implementaciones a gran escala en aplicaciones relacionadas con Internet de las Cosas (IoT). Desafortunadamente, una red que contiene una gran cantidad de nodos también genera dificultades en el proceso de configuración y asignación de identificadores a los nodos. Se han propuesto varios enfoques para resolver problemas de autoconfiguración en WSN, sin embargo, todavía quedan algunos problemas relacionados con la asignación automática de identificadores. Se propone un esquema de asignación de direcciones global jerárquica basado en clústeres para una red de sensores inalámbricos. La propuesta utiliza el protocolo IEEE 802.15.4 y tiene como objetivo reducir la latencia de las asignaciones de identificadores y los procesos a nivel de red que se ejecutan en el nodo. El proceso de asignación de direcciones asigna a cada nodo una dirección global única, lo que permite que el nodo tenga conectividad de extremo a extremo sin implicación a nivel de red. Se contempla el escenario de agregar nuevos nodos a la red o nodos que la abandonen. Finalmente, se evalúa experimentalmente el esquema propuesto verificando el correcto funcionamiento del algoritmo propuesto en el prototipo implementado.

Palabras clave

Nivel de enlace, direcciones globales, sensores, grupos, configuración, redes.

1. Introduction

The implementation of wireless sensor networks (WSN) based on the IEEE 802.15.4 link protocol (Gallegos & Noguchi, 2019, Feb. 17-20), in conjunction with network protocols like 6LoWPAN (Yang et al., 2019), ZigBee (Mahlknecht et al., 2016), it has allowed increasing the number of

1 Escuela Politécnica Nacional (EPN). Quito, Ecuador [carlos.egas@epn.edu.ec, https://orcid.org/0000-0002-3540-9768]

2 Escuela Politécnica Nacional (EPN). Quito, Ecuador [david.cali@epn.edu.ec, https://orcid.org/0000-0002-1790-1783]

3 Asociación de Empresas Proveedoras de Internet (AEPROVI). Quito, Ecuador [cristian@aeprovi.org.ec, https://orcid.org/0000-0003-2920-8991]

applications in various areas, such as home automation (Abella et al., 2019), farming (Sharma et al., 2019), health (Adame et al., 2018), traffic monitoring (Vachan & Mishra, 2019, April 12-15), forest fires (Kadir et al., 2019, Oct. 2-4) and industrial areas (Queiroz et al., 2017), due to the low cost and ease of implementation. The internet of all things (IoT) is one of the technological trends that is being adopted with more force today, which uses several communication technologies, one of them is the Wireless Sensor Network (WSN) which are characterized by being made up of sensor nodes that operate with batteries and with low computing capacity (Sharma et al., 2020).

Wireless sensor networks have limited resources (Srivastava et al., 2018, Oct. 3-4) and therefore need to be designed efficiently to facilitate their deployment and configuration. Furthermore, due to a large number of sensor nodes, the self-configuration of the network is a technological challenge (Kobo et al., 2017). Unfortunately, in a network that contains a large number of nodes, the address allocation processes (Lakshmi et al., 2018, Jan 10-12), as well as the formation of the topology, take a large amount of time. Within the network with a small number of sensors, the administrator can easily assign addresses. However, as the number of nodes increases, this way of assigning them is not appropriate and therefore an automatic configuration is necessary.

Automatic configuration in a WSN (Dinh & Kim, 2019) is a name for proposals characterized by an automatic assignment of addresses to the nodes, as well as for the automatic definition of the network topology. The experiences obtained have determined that self-organization, self-configuration to have automatic connectivity and connection to the Internet, is an important research topic in large scale wireless sensor networks.

In general, this type of configuration is implemented in one node and then the other nodes in the network are automatically configured. These mechanisms are easy to use, have a quick deployment and are energy efficient (More & Raisinghani, 2017). Regardless of the area in which wireless sensor networks are used, it is necessary for the nodes to have a global address on the network that facilitates the sending and receiving of data, and the route by which the data can reach their destination, tasks that are performed by network protocols such as 6LowPAN and Zigbee.

With hundreds or thousands of nodes the processing times to assign identifiers and define the topology are high especially when it comes to multi-hop networks. In these cases data transmission may to have great delays due to paths that have a large number of hops (Chughtai et al., 2017).

The high times to have the large-scale wireless sensor network self-configured and ready to use, are basically due to the low processing capacity of the nodes, which makes it impossible to reuse network routing protocols. Internet, causing the emergence of standards like 6LowPAN which is an adaptation of the IPv6 protocol. In other cases, routing protocols on a wireless sensor network are proprietary to manufacturers.

Sensors nodes can be partitioned into multiple clusters to employ techniques that reduce the size of the network and simplify routing decisions and reduce the processing delay on the node. These techniques divide nodes into clusters, each having a designated cluster head that computes local routing decisions among sensors within its own cluster (Curry & Smith, 2016) and the data originating at nodes located at nodes in a routing tree may require a large number hops for end to end transmission.

Our proposal consists of verifying that only using the link level processes, specifically the IEEE 802.15.4 protocol, it is possible to automatically assign global addresses to the nodes (Egas et al., 2016, Nov. 15-17) and generate the wireless network topology of multi-hop sensors, which allows end-to-end connectivity within the network, without using network-level processes (network protocols), so that the identifiers assigned by the link-level not only serve for communication between contiguous nodes, but also for communications between source node and destination node in the personal wide area network. The use of the link-layer to define the network topology, as well as assigning global addresses to the nodes, reduces the processing delays at the node and also optimizes energy consumption due to the fact that the processes to be carried out are reduced at the node.

Since experimenting with wireless sensor networks began, there has already been a debate about the relevance that a wireless sensor network should replicate the layered structure of the Internet or if it should have a more flexible design taking into account the characteristics of nodes that have low computing capacities and work with batteries

We consider that removing the network layer from the architecture of wireless sensor networks is appropriate, given that up to now there are two trends to define its architecture, the first one that tries to follow the layer-model of the architecture of the Internet, a proposal that is limited by the processing capacity of the nodes, and the other trend in which the architecture is directly associated with the applications (Kumar et al., 2014).

Our work is essential to facilitate the deployment of simple and cheap WSNs, pave the way for the implementation of new services and EoT applications (Torres-Ruiz et al., 2018) and take advantage of new paradigms such as fog computing (Rahbari & Nickray, 2019), cloud computing (Dwivedi & Kumar, 2018, Nov. 2-4) and the analysis of large amounts of data (Kim et al., 2019) also in WSNs.

The validity of our proposal was checked on a prototype of a wireless sensor network, using development software that allows the IEEE 802.15.4 standard frames to be manipulated directly without the need to load an operating system on the nodes. The algorithm is executed in each node and the verification of the operation is carried out in several test scenarios using a network prototype. In this context, our proposal generates the following contributions:

- Automatically assigning global addresses at the link-layer, which are also used as network-layer identifiers using the IEEE 802.15.4 protocol.
- Tree topology creation for a multi-hop wireless sensor network using the IEEE 802.15.4 protocol.
- Decreased network autoconfiguration time.

2. Related work

In general, self-organization is the process of autonomy and formation of connectivity, addressing and routing (Hilmani et al., 2018, April, 23-24) which is limited by the characteristics of the sensor nodes. Different methods have been developed for autoconfiguring addressing in a WSN. In (Mavani & Asawa, 2019, Aug. 8-10) work studies, the effect of node wake-up frequency on the address configuration latency of IPv6 addressing deploys periodic pseudo-random IPv6 addressing scheme for low power 6LoWPANs to achieve privacy of the sensor nodes

An addressing scheme based on multi-hop clusters and aims to reduce addressing cost and delay in 6LoWPAN is proposed in (Dou et al., 2017). Each node employs beacons to obtain a unique address from a neighbor node. A cluster covers a multi-hop area, so the frequency of a sensor node performing the addressing is lowered and the total addressing cost and delay are reduced.

In (Wang et al., 2018) A hierarchical addressing scheme for 6LoWPAN is proposed in order to aim to reduce the addressing cost and latency. The proposed scheme includes the addresses of initialization and addresses maintenance algorithms. Each sensor node can be configured with a globally unique address without duplication address detection. After the address initialization process ends, a new node obtains a globally unique address. Released addresses are recovered for reuse so that there are enough address resources available.

In (Deshpande & Shankar, 2016, March, 4-6), a discrete cluster-based addressing scheme for WSNs based Internet of Things paradigm has been proposed. The authors propose to form clusters of wireless sensor nodes based on the type of application in sensor nodes. A unique address is assigned to every cluster and the sensor nodes.

Examples of routing protocols used by this technique are routing protocols for hierarchical networks called LEACH (Singh et al., 2017) which uses localized coordination and control for cluster formation and operation. In this protocol sensors elect themselves to serve as the cluster head based on residual energy levels among neighboring sensors nodes, PEGASIS (Ghosh et al., 2016, Feb. 25-26) is a proactive Hierarchical Routing protocols, the deployed nodes, forms a chain. Each node in the chain fuses its own data to the data received from its predecessor and sends the aggregated data to its successor along the chain except the terminal nodes.

In (Al-Dulaimy & Frey, 2019, Sept. 11-13) a approach to efficiently manage a software-defined wireless sensor networks is proposed by means of a hierarchical addressing scheme. It is based on a tree of address masks which are used to split the network into subnets. Each subnet is assigned a range of host addresses and a subnet header that is used as a gateway to its children. The sensor nodes need only to recognize the subnet where a packet is destined to and forward that packet to the subnet gateway.

Finally, it is necessary to mention the AODV protocol (Zrelli et al., 2019, Sept. 19-21) used by ZigBee, in case of knowing the network address, the link-layer address is requested using unicast. If not, it is requested by broadcast. ZigBee edge devices respond to these requests with their own addresses, while ZigBee routers and coordinators also send the addresses of all devices associated with them. Two addressing modes are used. On the one hand, direct addressing uses the radio address and the end node number, on the other hand, indirect addressing requires all relevant information and sends it to the network coordinator. In all the previous cases, the network address that allows end-to-end connectivity uses routing protocols, in order to preserve the paradigm of the internet architecture, however, due to the processing limitations of the sensor nodes, it is impossible to replicate Internet protocols in wireless sensor networks.

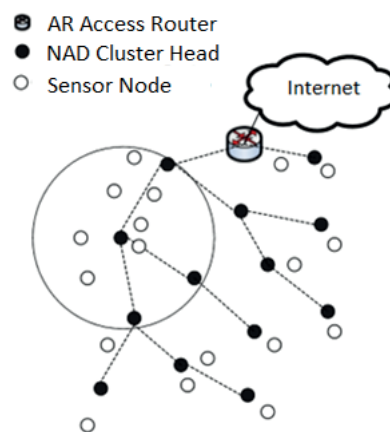
2. Methodology

The wireless sensor network is divided into a cluster, and each cluster is made up of a cluster Head. The network, Figure 1, is connected to the Internet through an access router (AR), the AR node and all the cluster header nodes form a tree where the root is AR, routing can be accomplished using hierarchical identifiers for each node, without storing routing information or setting routing.

In stateful address allocation schemes, cluster header nodes maintain allocation states to determine the availability of addresses to assign to a new node that connects to the network. A hierarchical assignment guarantees the assignment of unique global addresses. The group leader is only responsible for assigning addresses to the members of her cluster.

When a node requests an address from the cluster manager to join the tree topology network, acceptance of this request will depend on the availability of addresses for that group, therefore, the scalability of the network is limited by the number of free addresses to assign in each group. To overcome this limitation, we make use of the speed with which addresses are reassigned to the entire network because, in this case, the cluster manager does not have addresses to assign requests to his cluster manager (node that assign an address), reassign the addresses again to take into account the new nodes entered.

Figure 1. Multi-hop Wireless Sensor Networks



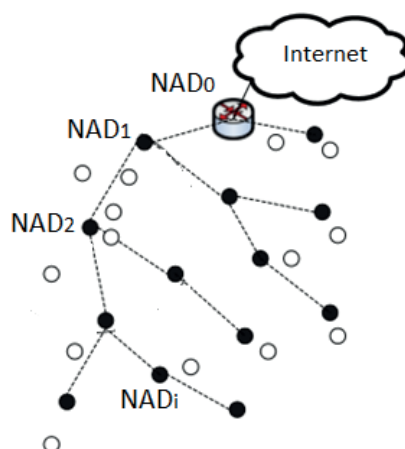
The IEEE 802.15.4 standard uses two types of addressing: short (16-bit) addressing and extended (64-bit) addressing for node-to-node connectivity. The selection of the type of addressing to be used is defined in the IEEE 802.15.4 frame header, which indicates the type of addressing that is being used, both for the source and the destination. This address allows each device to identify itself within the PAN personal area network. The coordinating node is able to assign the addresses to the other devices within the PAN network that are within its coverage area. The extended address is an identifier that each device has and is known as an IEEE address, which by analogy is compared to the MAC address of Ethernet systems.

2.1. Dynamic Allocation of Global Addresses

To perform the dynamic allocation of global addresses in the wireless network of multiple hop sensors, with fixed nodes that form a tree-type topology, we are going to use the addressing that is contemplated within the IEEE 802.15.4 standard.

In our proposal, the cluster head node is defined as an address assigning node, which is in charge of assigning addresses to the nodes that are within its coverage area, it is represented as NAD_i , where i represents the node position within the multi-hop path in the tree topology Figure 2. The AR access router, represented as NAD_0 , is the node that acts as a bridge to interconnect the internet network to the wireless sensor network and is known as the root node.

Figure 2. NAD Nodes



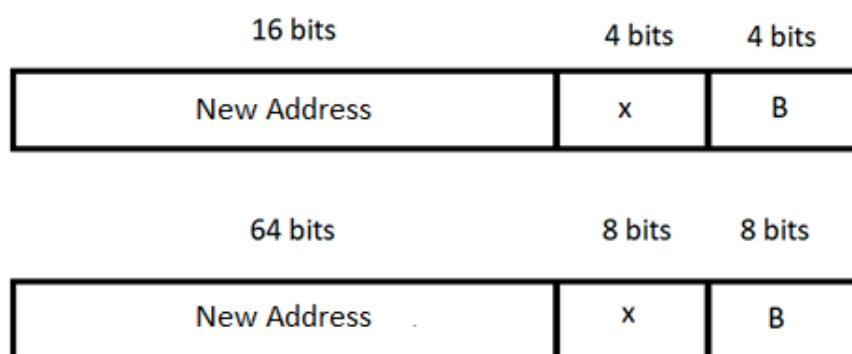
The NAD_i node assigns addresses to the nodes that are within its coverage area and its address that has an l_i value represented in x bits, this is taken as the basis for creating the address to assign to the nodes that have requested it be part of the network. If the number of nodes that have requested an address from the NAD_i node is n , the NAD_i node calculates the number of B bits, necessary to create the required addresses using the following expression:

$$B = \text{Log}_2 n$$

The address assigned to the node is represented as $l_i.j$ where $0 < j < n-1$. In this way, the assigned address will have a length of $(x + B)$ bits and will be part of the 16 or 64 bits associated with short or extended addressing.

The NAD_i node, which has an l_i address, sends a unicast frame with the information contained in 3 bytes, if the address is short or 10 bytes if the extended address Figure 3, information that is part of the data (payload) of the IEEE 802.15.4 frame.

Figure 3. Information Sent to the Nodes (short address)



The information sent contains the new node address, the values of x and B , so that the node requesting its address can recognize its new address, the address of the head of the cluster and the number of bits available to assign to new nodes in case it acts as a NAD_{i+1}

address allocator node. In this way, the NAD_{i+1} node, when it retransmits a frame sent to the Internet, sends it to the NAD_i node so that it reaches the AR node and therefore to its destination, in the same way, the node is able to know the range of addresses assigned to the nodes that are part of the coverage area of the NAD_i cluster head node. In conditions of high node density, a node may have multiple NAD_i nodes available, with addresses to assign. In the unlikely event that the NAD_i node has no leftover addresses, the node is responsible for requesting a new reassignment of addresses to its NAD_{i-1} group leader and thus allowing the entry of a new node.

Initially the node NAD₀, is configured to have an address of value $IO = 1$. The NAD₀ node sends a broadcast type frame to the nodes that are within its coverage range, indicating that it is ready to assign addresses. Later, the NAD₀ node receives the requests from the sensor nodes that need to be part of the network and therefore an address. If short addressing is used, the NAD₀ node has 15 bits to create addresses. If the number of nodes that require an address is $n = 18$, the number of bits required is $B = 5$ and work with a short address, in case the node NAD₀ assigns the value $j = 19$, it will send the following information: training the node requesting the address Figure 4.

Figure 4. Information Example Sent to the Nodes

1100110000000000	1000	1001
$l_0, j = 1.19$	$x=1$	$B=5$

In case the address is a short address Figure 5, the 16 bits are made up of:

Figure 5. Address Node

l_i	j	
x bits	B bits	$16 - x - B$ unused bits

During the address allocation process, it may happen that a sensor node is within the coverage area of several NAD_i nodes. The IEEE 802.15.4 protocol specifies that a radio's PHY layer must provide an 8-bit integer value as an estimate of the received signal power when the frame is received. This value is known as the Received Signal Strength Indication (RSSI) This value is used to select the closest NAD_i node, and will store the other addresses of the other NAD_i nodes that also emitted the broadcast to have them as backup nodes, when the NAD_i node that assigned the address is not operating and thus request a new address and have a new node that allows it to reach the AR node. Once the nodes have received the l_i, j address of the NAD_i node, each one operates as NAD_{i+1} to search for nodes within its coverage area.

The algorithm that determines the operation of a node is presented below. All nodes that are part of the infrastructure will run the same code.

Algorithm: Pseudo-code for our proposal

```

1  Input:  $li$  NAD $i$  address,  $li,s$  source address request node
2  If address-allocator-node = true then
3      If available addresses = true then
4          Calculates how many bits it has to assign addresses
5          NAD $i$  node send broadcast frame (ready to assign address)
6          while frame received then
7      if allocation request then
8          Store  $li,s$ 
9      Determine the number of requests
10         Calculate the value of  $x$  and  $B$ 
11         Calculate addresses to assign
12         Assign new address  $lij$  to node  $li,s$ 
13         Send the new address to the nodes
14         Awaiting confirmation of successful assignment
15         else
16             exit
17         endif
18     else send "addresses not available"
19     exit
20 endif
21 else
22 Request new address
23 if several nodes answer then
24     stores their addresses
25     selects the closest NAD $i$  node based on the received power.
26 endif
27 Request new address.
28 Receives the frame with the new address.
29 Update address.
30 Confirms change of address to the NAD $i$  node.
31     address allocator-node = true
32 endif

```

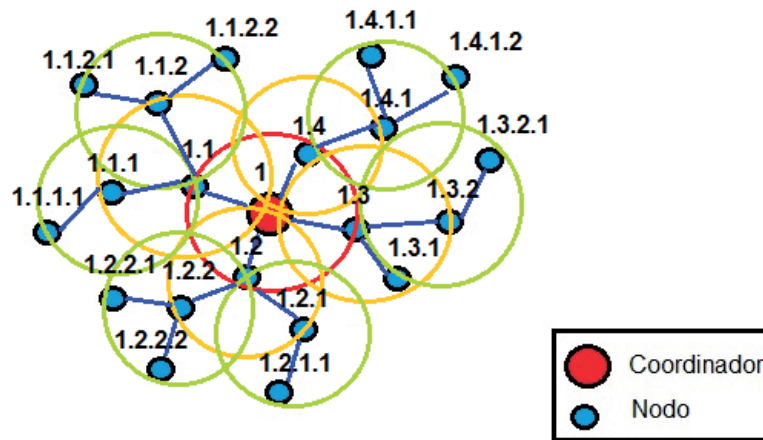
Table 1 presents an example of the number of addresses available when you have a tree network with a maximum of 4 NAD nodes that form one of the possible branches of the multi-hop network. If we consider the maximum range of 70 meters for each node, defined in the IEEE 802.15.4 protocol, the maximum coverage area of the network would have a radius of 280 meters, an area in which thousands of nodes should be in order to occupy all the possible directions.

Table 1. Available Address

NAD i	Bits used in the li identifier of the NAD i node	Bits available for new addresses	Available addresses
NAD_0	1	15	32767
NAD_1	4	12	4095
NAD_2	6	10	1023
NAD_3	10	8	255

As a result, Figure 6, a tree like topology is formed product of automatic address assignment.

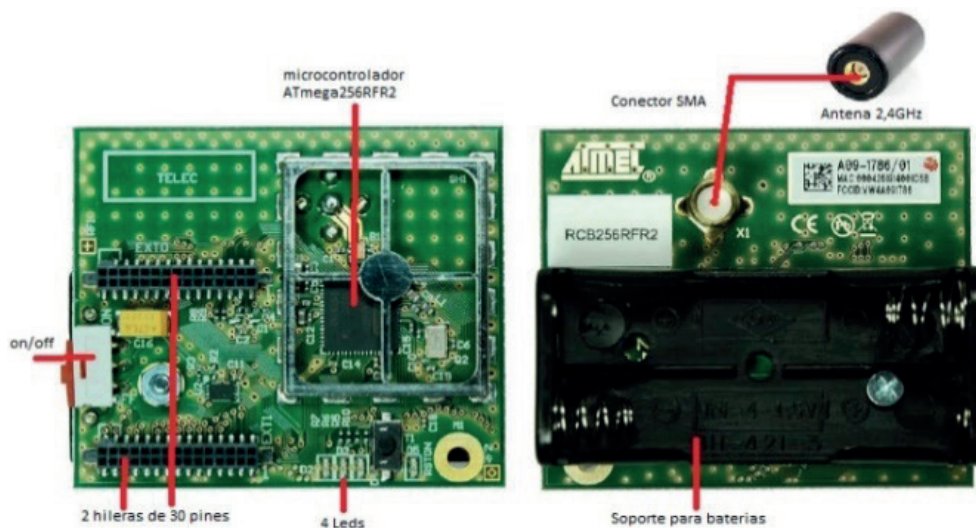
Figure 6. Tree Topology



3. Results

The RCB256RFR2 (ATMEL, 2013a) module Figure 7 used in the network prototype, allows to directly manage the link layer and directly manipulate the frame header of the IEEE 802.15.4 protocol. It is made up of an 8-bit microcontroller, ATmega256RFR2 from Atmel, it is powered by AAA batteries.

Figure 7. RCB256RFR2 Module



For the radio frequency part, the RCB256RFR2 module has a transceiver that operates at 2.4GHz and is compatible with the IEEE 802.15.4 standard. For the development of the algorithm for automatic addressing and definition of the topology, using the IEEE 802.15.4 standard, we use the development software ASF® (Atmel Software Framework) (ATMEL, 2013b) proposed by the manufacturer Atmel™, which has a set of the libraries that facilitate code creation

and programming, the most important is the Wireless Composer Development tool (Microchip, 2016) that allows systems to be easily evaluated and tested using the Atmel Studio.

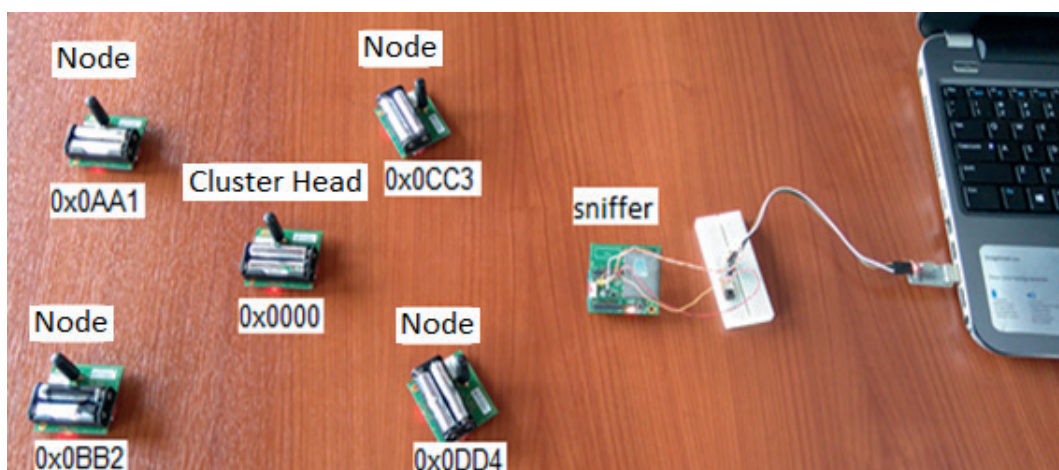
In each sensor node, the proposed algorithm was implemented. To demonstrate the address allocation dynamically, the creation of the tree type topology and the correct operation of the NAD_i nodes, IEEE 802.15.4 frame capture software was used, which provides us with the necessary information for verification.

The nodes operate with the IEEE 802.15.4 standard working in no beacon mode, using the Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA-CA) access method. In the event that there are failed links or errors in the transmission, the CSMA-CA protocol solves the problem by configuring the nodes to retransmit the frame in the event that a confirmation that the frame arrived successfully (acknowledge ACK) is not received. In the tests, five RCB256R-FR2 modules were used, the module that works as NAD₀ is initialized with the address 0x0000, the remaining four modules will fulfill the role of sensor nodes that require an address to be assigned to be part of the wireless sensor network and after they have already assigned their address, these nodes start assigning addresses to the nodes that are within their coverage area.

3.1. Start Topology

In this scenario, all sensor nodes are within the coverage area of the NAD₀ node Figure 8, the nodes are within the coverage area of the NAD₀ node, and the sniffer node is positioned in a position that can capture the frames of all nodes. The nodes are initialized with the following random addresses 0x0AA1, 0x0BB2, 0x0CC3 and 0x0DD4.

Figure 8. Nodes without Topology



The moment the nodes are switched on the node NAD₀ sends a broadcast frame Figure 9. The header of the IEEE 802.15.4 frame begins to the right of the graph and the Little-endian rule is used for its interpretation the payload of the frame can be identified without difficulty. As you can see, the first four frames indicate the sequence with which the nodes were turned on, the fifth frame is that of the coordinator when sending the broadcast, this frame is the one that begins the assignment of the new addresses.

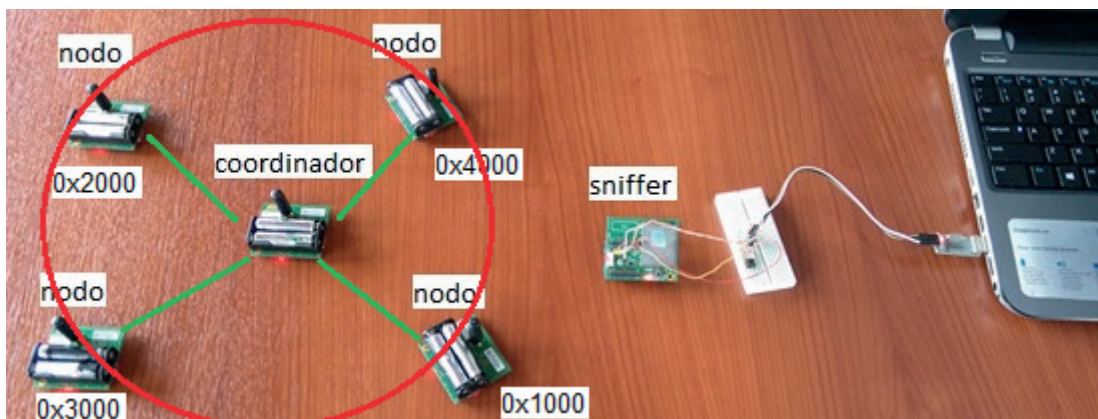
Figure 9. Frames Transmitted

Monitoreo		
Procesar	Procesar Todo	Borrar Tramas
		Canal : 17
		Tramas = 21
Tiempo	Tipo	Trama
Tiempo: 155656511	Datos:	0F 41 88 00 FE CA A1 0A A1 0A 4D 59 49 44 E5 C2 AA
Tiempo: 156084738	Datos:	0F 41 88 00 FE CA C3 0C C3 0C 4D 59 49 44 39 F6 B2
Tiempo: 157110981	Datos:	0F 41 88 00 FE CA B2 0B B2 0B 4D 59 49 44 11 C9 72
Tiempo: 157845408	Datos:	0F 41 88 00 FE CA D4 0D D4 0D 4D 59 49 44 BF FB 8C
Tiempo: 229654064	Datos:	14 41 88 00 FE CA FF FF 00 00 42 52 4F 41 44 43 41 53 54 44 46 A5
Tiempo: 230320312	Datos:	14 41 88 01 FE CA 00 00 D4 0D 49 44 52 45 51 55 45 53 54 BC 60 7F
Tiempo: 230489854	Datos:	14 41 88 01 FE CA 00 00 A1 0A 49 44 52 45 51 55 45 53 54 47 F1 AA
Tiempo: 230827693	Datos:	14 41 88 01 FE CA 00 00 B2 0B 49 44 52 45 51 55 45 53 54 96 52 8C
Tiempo: 230833447	Datos:	14 41 88 01 FE CA 00 00 C3 0C 49 44 52 45 51 55 45 53 54 38 9D B6
Tiempo: 233205967	Datos:	14 41 88 01 FE CA FF FF 00 00 42 52 4F 41 44 43 41 53 54 54 C8 A5
Tiempo: 233871790	Datos:	14 41 88 02 FE CA 00 00 D4 0D 49 44 52 45 51 55 45 53 54 9D FA 7B
Tiempo: 233874365	Datos:	0D 41 88 02 FE CA D4 0D 00 00 31 0C 66 5F A1
Tiempo: 234043224	Datos:	14 41 88 02 FE CA 00 00 A1 0A 49 44 52 45 51 55 45 53 54 66 6B AE
Tiempo: 234045155	Datos:	0D 41 88 03 FE CA A1 0A 00 00 32 0C A9 D9 A5
Tiempo: 234377931	Datos:	14 41 88 02 FE CA 00 00 B2 0B 49 44 52 45 51 55 45 53 54 B7 C8 8C
Tiempo: 234380503	Datos:	0D 41 88 04 FE CA B2 0B 00 00 33 0C 1A 6C A5
Tiempo: 234384627	Datos:	14 41 88 02 FE CA 00 00 C3 0C 49 44 52 45 51 55 45 53 54 19 07 B6
Tiempo: 234540266	Datos:	0D 41 88 03 FE CA FF FF 00 10 46 42 D3 A0 7F
Tiempo: 234872833	Datos:	0D 41 88 03 FE CA FF FF 00 20 46 42 7D 26 AE
Tiempo: 235553470	Datos:	0D 41 88 03 FE CA FF FF 00 30 46 42 E8 A3 8C
Tiempo: 235564598	Datos:	0D 41 88 03 FE CA FF FF 00 40 46 42 30 23 B6

The time is measured in microseconds and the time elapsed since the NADO node sends the broadcast frame, at time "229654064" until it sends the last unicast frame with the last address to be assigned at time "235564598", indicates that the time required for the 4-node star network to be operational is 5.9 seconds. Performing a projection of more than 4 nodes, we can deduce that the time to assign identifiers to 1000 nodes is 1475 seconds.

In this way, the star type topology is formed Figure 10 having as node root of the topology the node NADO and the nodes with the new assigned addresses.

Figure 10. Topology Formed



3.2. Tree Topology

In this scenario, the nodes were placed in such a way to have a multi-hop network and form a tree-like topology. The nodes were configured to have a coverage area with a radius of 14 meters. The nodes that are closest to the NADO node were located at a distance of approximately

10 meters, the farthest nodes were located at 20 meters, in order that they are outside the coverage range of the node and do not receive the broadcast sent by this node. In the section marked in blue, you can see the first four initial frames of the nodes, this shows the sequence of how the nodes were turned on. The source and destination addresses must be interpreted from right to left, the fifth frame corresponds to the broadcast type frame made by the coordinator once switched on.

The section marked with yellow Figure 11, shows that node 0x0AA1 responds to the broadcast of node NAD₁ with address 0x2000, resends the broadcast this time node 0x0DD4 responds and also to node 0x0AA1.

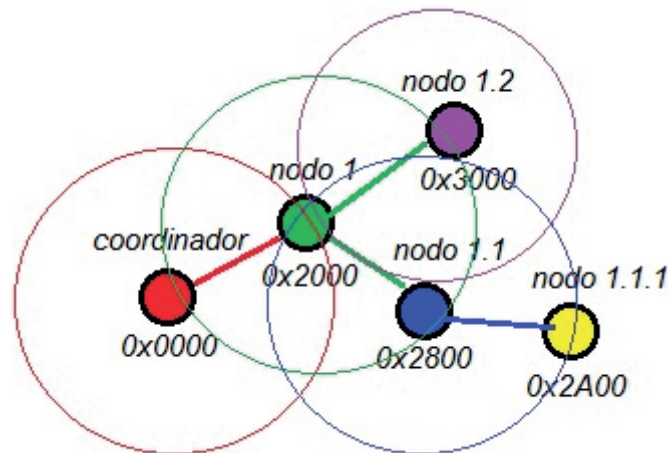
Figure 11. Frames Transmitted

Procesamiento		direcciones			
Borrar Tramas Procesadas		PAN ID	destino	origen	carga util
☒	Tiempo: 2087886437	Datos: 0F 41 88 00 FE CA	B2 0B	B2 0B	4D 59 49 44 11 C9 26
☒	Tiempo: 2093654061	Datos: 0F 41 88 00 FE CA	A1 0A	A1 0A	4D 59 49 44 E5 C2 4C
☒	Tiempo: 2105613866	Datos: 0F 41 88 00 FE CA	C3 0C	C3 0C	4D 59 49 44 39 F6 04
☒	Tiempo: 2112088195	Datos: 0F 41 88 00 FE CA	D4 0D	D4 0D	4D 59 49 44 BF FB 04
☒	Tiempo: 2141552583	Datos: 14 41 88 00 FE CA	FF FF	00 00	42 52 4F 41 44 43 41 53 54 44 46 4C
☒	Tiempo: 2142389688	Datos: 14 41 88 01 FE CA	00 00	B2 0B	49 44 52 45 51 55 45 53 54 96 52 19
☒	Tiempo: 2145270949	Datos: 14 41 88 01 FE CA	FF FF	00 00	42 52 4F 41 44 43 41 53 54 54 C8 4C
☒	Tiempo: 2146107334	Datos: 14 41 88 02 FE CA	00 00	B2 0B	49 44 52 45 51 55 45 53 54 B7 C8 19
☒	Tiempo: 2146110561	Datos: 0D 41 88 02 FE CA	B2 0B	00 00	31 0D 3C EA 48
☒	Tiempo: 2146948705	Datos: 0D 41 88 03 FE CA	FF FF	00 20	46 42 7D 26 11
☒	Tiempo: 2148781675	Datos: 14 41 88 01 FE CA	00 20	A1 0A	49 44 52 45 51 55 45 53 54 F7 DA 26
☒	Tiempo: 2151622421	Datos: 14 41 88 04 FE CA	FF FF	00 20	42 52 4F 41 44 43 41 53 54 93 C2 1D
☒	Tiempo: 2152948671	Datos: 14 41 88 01 FE CA	00 20	D4 0D	49 44 52 45 51 55 45 53 54 0C 4B 0C
☒	Tiempo: 2152958211	Datos: 0D 41 88 05 FE CA	D4 0D	00 20	31 0B 00 C1 19
☒	Tiempo: 2153455143	Datos: 14 41 88 02 FE CA	00 20	A1 0A	49 44 52 45 51 55 45 53 54 D6 40 26
☒	Tiempo: 2153464353	Datos: 0D 41 88 06 FE CA	A1 0A	00 20	32 0B 35 DC 19
☒	Tiempo: 2154284503	Datos: 0D 41 88 02 FE CA	FF FF	00 28	46 42 42 AD 11
☒	Tiempo: 2155295870	Datos: 0D 41 88 03 FE CA	FF FF	00 30	46 42 E8 A3 26
☒	Tiempo: 2155960273	Datos: 14 41 88 01 FE CA	00 28	C3 0C	49 44 52 45 51 55 45 53 54 64 BC 04
☒	Tiempo: 2158772248	Datos: 14 41 88 03 FE CA	FF FF	00 28	42 52 4F 41 44 43 41 53 54 F9 19 0C
☒	Tiempo: 2160449295	Datos: 14 41 88 03 FE CA	00 28	C3 0C	49 44 52 45 51 55 45 53 54 55 A8 04
☒	Tiempo: 2160458755	Datos: 0D 41 88 04 FE CA	C3 0C	00 28	31 09 08 3C 0C
☒	Tiempo: 2162134130	Datos: 0D 41 88 04 FE CA	FF FF	00 2A	46 42 E5 BC 04

The node assigns the following addresses 0x2800 and 0x3000 to the nodes respectively, as seen in the last two lines of this section, each of these nodes becomes NAD nodes and sends the broadcast once they have been assigned addresses. Finally, the section marked in green shows that the last node 0x0CC3 that has not yet been assigned the address responds to the first broadcast sent by address 0x2800 and this node assigns it address 0x2A00. Once assigned its address, the process repeats at each node.

As a result of executing our algorithm, a hierarchical addressing was obtained and a tree-like topology was formed as shown in Figure 12.

Figure 12. Topology Formed



5. Conclusions

The need for more dynamic and capable solutions in the Industry 4.0 field, has contributed to increase applications require low delays and long operating times from the WSN.

This document demonstrates that it is possible to adapt the IEEE 802.15.4 standard in a simple way to have global auto configuration. The link level identifiers are used as global identifiers. It is shown that, with the assigned addresses, the tree type topology is formed, which allows each node to know which is the next node to send the frame to so that it reaches the root node without using processes at the network-layer.

Our proposal, use address allocation schemes, cluster based. The nodes maintain allocation states to determine the availability of addresses to assign to a new node that connects to the network. The hierarchical assignment guarantees the assignment of unique global addresses. Currently, we are working on the development of a routing protocol based solely on the link level for wireless sensor networks.

References

- Abella, C. S., Bonina, S., Cucuccio, A., D'Angelo, S., Giustolisi, G., Grasso, A. D., Imbruglia, A., Mauro, G. S., Nastasi, G. A. M., Palumbo, G., Pennisi, S., Sorbello, G., & Scuderi, A. (2019). Autonomous Energy-Efficient Wireless Sensor Network Platform for Home/Office Automation. *IEEE Sensors Journal*, 19(9), 3501-3512. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2892604>
- Adame, T., Bel, A., Carreras, A., Melià-Seguí, J., Oliver, M., & Pous, R. (2018). CUIDATS: An RFID-WSN Hybrid Monitoring System for Smart Health Care Environments. *Future Generation Computer Systems*, 78 (part 2), 602-615. <https://doi.org/10.1016/j.future.2016.12.023>
- Al-Dulaimy, A. N., & Frey, H. (2019, Sept. 11-13). *Subnet Addressing in Software Defined Wireless Sensor Networks* [Proceedings]. 12th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC), Paris, France. <https://doi.org/10.23919/WMNC.2019.8881822>
- ATMEL. (2013). *Atmel AVR10004: RCB256RFR2 – Hardware User Manual*. <https://bit.ly/3o0i6Bn>
- ATMEL. (2013). *Atmel AVR4029: Atmel Software Framework User Guide*. <https://bit.ly/3q1vNSl>

- Chughtai, O., Badruddin, N., Rehan, M., & Khan, A. (2017). Congestion Detection And Alleviation in Multihop Wireless Sensor Networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2017 (Article ID 9243019), pp. 13. <https://doi.org/10.1155/2017/9243019>
- Curry, R. M., & Smith, J. C. (2016). A Survey of Optimization Algorithms for Wireless Sensor Network Lifetime Maximization. *Computers and Industrial Engineering*, 101, 145-166 <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.08.028>
- Deshpande, S., & Shankar, R. (2016, March, 4-6). *A Discrete Addressing Scheme for Wireless Sensor Networks Based Internet of Things* [Proceedings]. 2016 22nd National Conference on Communication (NCC), Guwahati, India. <https://doi.org/10.1109/NCC.2016.7561161>
- Dinh, N. T., & Kim, Y. (2019). Auto-configuration in Wireless Sensor Networks: A Review. *Sensors*, 19(19), 4281. <https://doi.org/10.3390/s19194281>
- Dou, Z., Wang, X., & Wang, D. (2017). Addressing for 6LoWPAN Based on Multi-hop Clusters. *International Journal of Internet Protocol Technology*, 10(4) <https://doi.org/10.1504/ijipt.2017.10009873>
- Dwivedi, R. K., & Kumar, R. (2018, Nov. 2-4). *Sensor Cloud: Integrating Wireless Sensor Networks with Cloud Computing* [Proceedings]. 2018 5th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON), Gorakhpur, India. <https://doi.org/10.1109/UPCON.2018.8597008>
- Egas, A. C., Gil-Castineira, F., Costa-Montenegro, E., & Silva, J. S. (2016, Nov. 15-17). *Automatic Allocation of Identifiers in Linear Wireless Sensor Networks Using Link-level Processes* [Proceedings]. 2016 8th IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM), Medellín, Colombia. <https://doi.org/10.1109/LATINCOM.2016.7811574>
- Gallegos, A., & Noguchi, T. (2019, Feb. 17-20). *IEEE 802.15.4 Historical Evolution and Trends* [Proceedings]. 21st International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), PyeongChang Kwangwoon_Do, Korea South. <https://doi.org/10.23919/ICACT.2019.8702040>
- Ghosh, S., Mondal, S., & Biswas, U. (2016, Feb. 25-26). *Enhanced PEGASIS Using Ant Colony Optimization for Data Gathering in WSN* [Proceedings]. 2016 International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES), Chennai, India. <https://doi.org/10.1109/ICICES.2016.7518930>
- Hilmani, A., Maizate, A., & Hassouni, L. (2018, April, 23-24). *An Advanced Comparative Study of Self-organization Protocols in Wireless Sensor Network* [Proceedings]. 2018 Renewable Energies, Power Systems and Green Inclusive Economy, REPS and GIE Casablanca, Morocco. <https://doi.org/10.1109/REPSGIE.2018.8488846>
- Kadir, E. A., Rosa, S. L., & Yulianti, A. (2019, Oct. 2-4). *Application of WSNs for Detection Land and Forest Fire in Riau Province Indonesia* [Proceedings]. 2019 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS), Pangkal Pinang, Indonesia. <https://doi.org/10.1109/ICECOS.2018.8605197>
- Kim, B. S., Kim, K. Il, Shah, B., Chow, F., & Kim, K. H. (2019). Wireless Sensor Networks for Big Data Systems. *Sensors*, 19(7), 1565. <https://doi.org/10.3390/s19071565>
- Kobo, H. I., Abu-Mahfouz, A. M., & Hancke, G. P. (2017). A Survey on Software-Defined Wireless Sensor Networks: Challenges and Design Requirements. *IEEE Access*, 5, 1872-1899. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2666200>
- Kumar S., A. A., Ovsthus, K., & Kristensen., L. M. (2014). An Industrial Perspective on Wireless Sensor Networks-A Survey Of Requirements, Protocols, and Challenges. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 16(3), 1391-1412. <https://doi.org/10.1109/SURV.2014.012114.00058>
- Lakshmi, P. S., Jibukumar, M. G., & Neenu, V. S. (2018, Jan 10-12). *Network Lifetime Enhancement of Multi-Hop Wireless Sensor Network by RF Energy Harvesting* [Proceedings]. International Conference on Information Networking, Chiang Mai, Thailand. <https://doi.org/10.1109/ICOIN.2018.8343216>
- Mahlknecht, S., Dang, T., Manic, M., & Madani, S. A. (2016). ZigBee. En *Industrial Communication Systems*. <https://doi.org/10.1016/b978-155558310-1/50015-x>

- Mavani, M., & Asawa, K. (2019, Aug. 8-10). *2019 Performance Study of Node Wakeup Rate on the Privacy Enabled Addressing Scheme in Duty-Cycled 6lowpan* [Proceedings]. 2019 12th International Conference on Contemporary Computing (IC3), Noida, India. <https://doi.org/10.1109/IC3.2019.8844878>
- Microchip. (2016). *Wireless Composer*. <https://bit.ly/3l90XlA>
- More, A., & Raisinghani, V. (2017). A Survey on Energy Efficient Coverage Protocols in Wireless Sensor Networks. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 29(4), 428-448. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2016.08.001>
- Queiroz, D. V., Alencar, M. S., Gomes, R. D., Fonseca, I. E., & Benavente-Peces, C. (2017). Survey and Systematic Mapping of Industrial Wireless Sensor Networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 91(1), 96-125. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.08.019>
- Rahbari, D., & Nickray, M. (2019). Low-latency and Energy-Efficient Scheduling in Fog-based IoT Applications. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 27, 1406-1427. <https://doi.org/10.3906/elk-1810-47>
- Sharma, H., Haque, A., & Jaffery, Z. A. (2019). Maximization of Wireless Sensor Network Lifetime Using Solar Energy Harvesting for Smart Agriculture Monitoring. *Ad Hoc Networks*, 94(101966). <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2019.101966>
- Singh, S. K., Kumar, P., & Singh, J. P. (2017). A Survey on Successors of LEACH Protocol. *IEEE Access*, 5, 4298-4328. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2666082>
- Srivastava, S., Singh, M., & Gupta, S. (2018, Oct. 3-4). *Wireless Sensor Network: A Survey* [Proceedings]. 2018 International Conference on Automation and Computational Engineering (ICACE), Greater Noida, India. <https://doi.org/10.1109/ICACE.2018.8687059>
- Torres-Ruiz, M., Lytras, M. D., & Mathkour, H. (2018). Innovative Services and Applications of Wireless Sensor Networks: Research Challenges and Opportunities. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 14(5), s. p. <https://doi.org/10.1177/1550147718772973>
- Vachan, B. R., & Mishra, S. (2019, April 12-15). *A User Monitoring Road Traffic Information Collection Using SUMO and Scheme for Road Surveillance with Deep Mind Analytics and Human Behavior Tracking* [Proceedings]. 2019 IEEE 4th International Conference on Cloud Computing and Big Data Analytics (ICCCBDA), Chengdu, China. <https://doi.org/10.1109/ICCCBDA.2019.8725761>
- Wang, X., Le, D., & Cheng, H. (2018). Hierarchical Addressing Scheme for 6LoWPAN WSN. *Wireless Networks*, 24, 1119-1137 <https://doi.org/10.1007/s11276-016-1394-9>
- Yang, W., Fan, Z., & Wu, F. (2019). Design of Wireless Sensor Network Based on 6LoWPAN and MQTT. *Journal of National University of Defense Technology*, 41(9), 161-168. <https://doi.org/10.11887/j.cn.201901022>
- Zrelli, A., Khlaifi, H., & Ezzedine, T. (2019, Sept. 19-21). *2019 Performance Evaluation of AODV and OAODV for Several WSN/IoT Applications* [Proceedings]. International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), Split, Croatia. <https://doi.org/10.23919/SOFTCOM.2019.8903830>

Impactos ambientales en la tira litoral de la costa por acción antrópica en la ciudad de Trujillo, Perú

(Environmental Impacts on the Littoral Coastal Strip by Anthropic Action in the City of Trujillo, Perú)

Carlos A. Bocanegra García¹, Bilmia Veneros Urbina², Zoila Culquichicón Malpica³

Resumen

En la presente investigación se describen y analizan los impactos de la transformación antrópica de la franja costera litoral de la ciudad de Trujillo, debido a la construcción y ampliación sistemática de una estructura rígida denominada molón retenedor de arena en el puerto de Salaverry. Se describen y analizan los impactos de la transformación antrópica de la franja y sus consecuencias debido a la construcción del molón retenedor. Se utilizaron imágenes satelitales, fotografías y cartas hidrográficas para el análisis buscando concientizar e incentivar a científicos, autoridades y ciudadanía en general sobre la conservación de la costa y el salvamento de esta. Los principales impactos están relacionados con la modificación de la línea de costa a los que se adicionan la destrucción de playas y la alteración de los ecosistemas. La erosión como fenómeno ha ido afectando a muchas áreas costeras, pero en esta en particular, el problema se ha acrecentado y parece no detenerse, aun cuando se conocen todos los aspectos e impactos climáticos que esto pueda generar, tales como desestabilizar los hábitats naturales y cambiar las conductas de las mareas, direccionándolas a áreas no previstas.

Palabras clave

Impactos, antrópica, franja costera litoral, erosión; ecosistemas.

Abstract

The present research describes and analyzes the impacts of the anthropic transformation of the coastal strip of the city of Trujillo, due to the systematic construction and expansion of a rigid structure called sand retaining mill in the port of Salaverry. It is described and analyzed the impacts of the anthropic transformation of the strip and its consequences due to the construction of the retention molon. Satellite images, photographs and hydrographic charts were used for the respective analysis seeking to raise awareness and encourage scientists, authorities and citizens in general to conserve the coast and save it. The main impacts are referred to the modification of the coast line, adding the destruction of beaches and the alteration of ecosystems. Erosion as a phenomenon has been affecting many coastal areas, but in this one in particular the problem has increased and seems not to stop even knowing all the aspects and climatic impacts that this may generate, destabilizing natural habitats and changing the behavior of the tides by directing them to unforeseen areas. With the problem posed.

Keywords

Impacts, anthropic, coastal strip, erosion, ecosystems.

1. Introducción

Entre los años 50 y 60, la empresa Whimpey construyó el puerto de Salaverry, pero años después surgieron dos problemas: olas grandes y arenamiento. Además, la búsqueda de solución a estos problemas ocasionó nuevos inconvenientes. Entre las soluciones se propuso que, paralelo a construir rompeolas, debería haberse construido un retenedor de arena para solucionar el problema del puerto, así como la construcción del rompeolas al noroeste, para disminuir las

1 Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú [carlosbocanegrargarcia2020@gmail.com, http://orcid.org/0000-0001-9063-7600]
2 Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú [bilmia.venurb@gmail.com, http://orcid.org/0000-0001-7367-3239]
3 Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú [culquichiconzoila@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4822-1254]

olas grandes en el puerto, y un retenedor de arena al suroeste, para evitar el arenamiento del puerto.

Todo lo que se construye en un espacio natural tiene efectos secundarios en otra zona; para evitar esto deben llevarse a cabo estudios que evalúen estos efectos antes de construir (Khalafallah et al., 2020). Las costas, en líneas generales, se han desgastado por la acción de las aguas del mar en todos los litorales. En el puerto de Salaverry se tiene previsto ejecutar dos obras complementarias: 1. Por medio de un sistema de *bypass*, trasladar hacia el norte la arena que era retenida al sur y 2. Construir varios espigones hacia el norte, en forma continuada, para distribuir la arena y evitar la erosión. (Bocanegra, 2016).

La arena viaja constantemente hacia el norte con la corriente del mar, pero en el litoral liberteño, específicamente en esa zona, se produce un traslado de arena de aproximadamente 1 000 000 m³ al año; con el retenedor se trasladarían aproximadamente 600 000 m³. Como se puede apreciar, desde 1980, se quedarían en el lado sur del retenedor 400 000 m³ cada año, lo que significaría que 12 000 000 m³ se habrían quedado en el sur en estos 30 años. En la Figura 1 se observa la distribución de la arena retenida.

Figura 1. Vista panorámica de Salaverry, donde se aprecia la arena retenida estos últimos 30 años

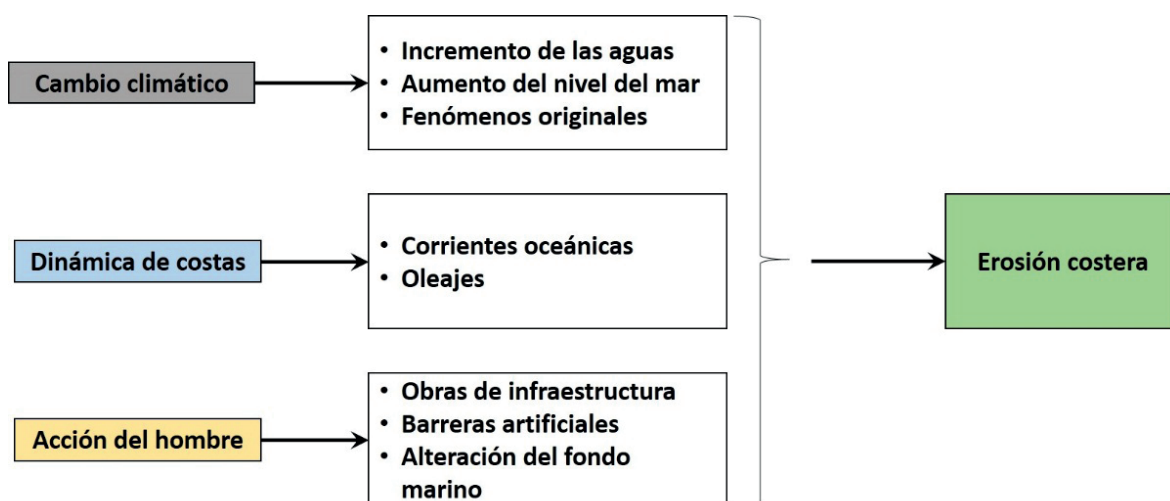


Son varios los factores que influyen en el proceso de erosión de las costas ocasionando, adicionalmente, sedimentación marina y destrucción de playas: la dirección de incidencia de las olas y la corriente marina. En el litoral de Trujillo una de las corrientes con mayor influencia es la corriente de Humboldt; esta repercute porque transporta sedimentos sólidos en el sentido sur-norte que, a lo largo del recorrido, arrastra por todas las cuencas fluviales de la zona (Bocanegra, 2016). Esta misma corriente, en primera instancia, no solo erosiona las costas, sino que va depositando sedimentos provenientes de otras cuencas fluviales, por cuanto el proceso

continuo es el causante de las morfologías de las playas. Si a ello se suman las construcciones hechas por el ser humano, el desgaste es mayor y la erosión y la acumulación de arena ocurre en grandes dimensiones (Grafals, 2018; Lu et al., 2019). En el esquema de la Figura 2, se puede observar en detalle los factores que influyen en el proceso de erosión.

El proyecto de instalación del puerto en el litoral marino de Salaverry por décadas ha causado impactos positivos en la economía local, pero también impactos negativos en el ecosistema natural y en las zonas urbanas. Esto significó la pérdida de las playas en Las Delicias, Buenos Aires y el comienzo de la destrucción de la playa de Huanchaco (Bocanegra, 2016). En esta investigación, se analizó la construcción y expansión sistemática de un rompeolas que retiene arena, que no solo retuvo sedimentos, sino que cambió la dirección actual y el tren de olas destruyendo la marina litoral y el ecosistema en forma gradual, lo que causó nuevos inconvenientes.

Figura 2. Factores que influyen el proceso de erosión



Se sabe que los sistemas litorales constituyen ambientes o áreas de transición entre el sistema marino y terrestre (Palau, 2018). Conceptualmente son ecotonos, fronteras ecológicas que son caracterizadas por procesos intensivos de intercambio de materia y energía (Jiao & Post, 2019). Estos son ecosistemas muy dinámicos, constantemente en evolución y cambio. Entre los procesos que afectan en el considerable dinamismo de la costa y de estos sistemas, se destacan los geomorfológicos, diferenciando dos tipos de costa: de erosión (acantilados) y de sedimentación (playas, bancos de arena y humedales) según Gómez-Robledo (2016).

Hay múltiples investigaciones en varias latitudes sobre los impactos humanos en la costa marina litoral como la construcción de embalses, en el Mediterráneo, y otras estructuras portuarias que tienen erosión generada y pérdida de playas, en América Central y América del Sur (Guerrero-Padilla et al., 2013). Aparte, Merlotto & Verón (2008) reportaron los mismos problemas en la costa argentina, donde se representa un retroceso de la línea del litoral por la erosión, lo que representa pérdidas innumerables. En el estudio realizado por Escudero-Castillo et al. (2018) sobre la erosión costera en Cancún se muestra la estrecha relación que existe entre la erosión de la playa de Cancún, desde finales de los años 70 y la alteración espacial y temporal de los servicios de protección del ecosistema desencadenada por la intervención antropogénica en la isla barrera. Un caso muy similar ocurre en la zona costera del Caribe colombiano,

donde a la morfología de la costa cambiante se le adicionan los sedimentos de los ríos cercanos y la erosión propia los alisios que llegan a esa zona (Posada & Henao, 2008). En Perú, hay conocimiento de este problema asociado principalmente a la ocupación del cinturón costero (Sánchez et al., 2010).

Si bien es cierto el molón causa un problema de erosión severa en la costa, no es todo el origen del problema; también la arena, como parte del depositario de los sedimentos que se extraen del dragado en la zona para la circulación de los barcos de cargas, genera circunstancias adicionales y acrecienta esta problemática causando un desequilibrio dinámico de la costa (Castro, 2015), como se puede observar en la Figura 3.

Los cambios realizados generan una interrogante respecto del estado de salud ambiental, particularmente en relación con el contenido de metales acumulados en el lecho marino (Boretto et al., 2018). Para la biota marina, los humanos y el ecosistema en general, como parte fundamental de este problema de las fuentes antropogénicas están inicialmente los metales pesados provenientes de desechos domésticos, agrícolas e industriales. Con esta perspectiva, se conoce que los sedimentos reaccionan como recursos secundarios de contaminación en el medio ambiente marino (Rodríguez-Alza et. al., 2016). Las actividades de dragado de sedimentos implican un proceso de extracción, erosión, transporte y disposición final, los cuales generan impactos ambientales negativos en los ecosistemas marinos. Lo peligroso es no llevar a cabo el debido estudio de impacto ambiental que asegure su minimización. Este hecho ocurrió en el 2011 en el puerto Salaverry (Perú), lo que significó contaminación con metales pesados en el agua superficial, los sedimentos y la fauna litoral. Los valores de los contaminantes químicos superaron los estándares internacionales, lo que pone en alto riesgo la salud pública (Bocanegra, 2016).

Figura 3. Dragado de la zona del puerto de Salaverry.



Detectar metales en los sedimentos o en la biota marina es el indicativo de los contaminantes que están en el medio ambiente y de los impactos que puedan generar. Los metales y trazas, siempre que su concentración sea elevada, van a generar alteraciones del equilibrio ecológico y biogeoquímico del ecosistema (Zúñiga, 2017). En otros estudios hechos en Chile, en la playa del Paraíso, antigua playa el Carboncillo, se presentaron los impactos similares con altas concentraciones de metales tanto en sedimentos como de biota por el tráfico del transporte

del puerto de Antofagasta (Rivas, 2015). La fabricación de la playa artificial cambió los causales porque no existía transporte o tráfico, y esto contribuyó a disminuir el cambio físico del lugar (Cruz, 2015). Sin embargo, según estándares internacionales establecidos para otros ambientes (As: $6 \mu\text{g g}^{-1}$, Pb: $35 \mu\text{g g}^{-1}$ y Zn: $103 \mu\text{g g}^{-1}$), los valores obtenidos de As, Pb y Zn siguen siendo altos y peligrosos (Lanire, 2015).

En las últimas décadas se han desarrollado procedimientos técnicos a nivel internacional como consecuencia de este problema. La misión ha sido proteger a la biota marina de todas las causas nocivas producidas por el uso de sustancias químicas contaminantes; evaluar y comparar los patrones de distribución espacial de sedimentos contaminados, y, diseñar y aplicar programas de monitoreo y remediación (Delshab et al., 2017; Rainbow & Furness, 2018; Rainbow, 2018). En otros países, como, por ejemplo, en Chile está en discusión un proyecto de ley sobre las normas de calidad de sedimentos marinos y lacustres donde se muestran concentraciones de metales correspondientes. Por el contrario, en Perú, se avanza poco y existen muchas inconsistencias en este sentido.

El problema de la erosión que se viene produciendo, más los impactos de la transformación antrópica de la franja y las consecuencias, a corto y a largo plazo, que pueda ocasionar la construcción del molon retenedor, dan énfasis a la investigación.

2. Metodología

La investigación incluyó el área entre el puerto de Salaverry ($8^{\circ} 13' 27'' \text{S}$ y $78^{\circ} 59' 52'' \text{W}$), Huanchaco ($8^{\circ} 03' 38'' \text{S}$ y $78^{\circ} 56' 58'' \text{W}$). Para comparar los puntos de variación de la costa, se utilizaron los planos comparados en el tiempo con registros satelitales para evaluar los impactos en el ecosistema. En la Figura 4 se observa una imagen del área de estudio.

Figura 4. Ubicación del área de estudio



El enfoque del entorno histórico que fue empleado consistió en ver las condiciones de la estructura, del medio ambiente y de la intervención humana, factores coadyuvantes en la intervención.

Para la investigación se elaboró un análisis documental. Se reunieron y analizaron las informaciones referentes a la zona por investigar, con mapas obtenidos del Google Earth, revisión bibliográfica de la Municipalidad Distrital de Trujillo y del Instituto de Hidráulica Ambiental (HD CANTABRIA). Se hizo el reconocimiento y delimitación del área de la costa de litoral de Trujillo, además de recopilar de datos y tomar fotografías del área de estudio resaltando el impacto ambiental producido por la erosión costera.

3. Resultados

Impactos ambientales

Inicialmente, se pudo constatar la transformación a todo lo largo del litoral costero. La construcción y expansión sistemática del rompeolas de retención de arena en el puerto Salaverry ha cambiado la costa por detener la reubicación de sedimentos; esta estructura actualmente mide 1050 m. En la Figura 5 se observa la vista del retenedor de arena rompeolas del puerto de Salaverry.

Figura 5. Vista del retenedor de arena rompeolas de Puerto Salaverry



La construcción del rompeolas al inicio ha retenido más de 90 000 000 m³ de arena para el sur del puerto y ha erosionado la parte norte modificando también la costa. Actualmente 60 000 000 m³ de arena se han acumulado en el puerto de Salaverry y que pertenecen a las playas de Trujillo.

En las Figuras 6 y 7, la línea amarilla representa la línea anterior de la construcción del rompeolas y la roja está después del rompeolas. Se ve cómo se ha modificado y movilizado la arena sustancialmente a través de los años.

Figura 6. Vista de la variación de la costa del lado sur del puerto de Salaverry

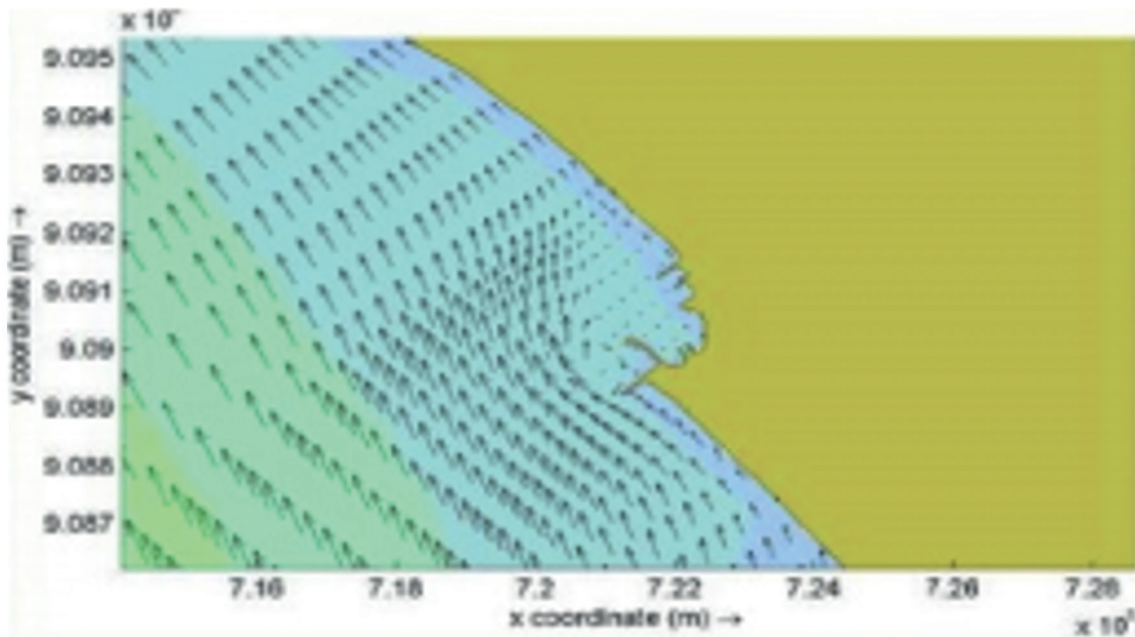


Figura 7. Imagen satelital del cambio de la costa en el lado sur de Salaverry Puerto



En la Figura 8 se observa tanto el cambio de las corrientes como el retenedor de arena rompeolas que han originado el cambio de la transferencia de energía de las corrientes.

Figura 8. Representación del sistema de corrientes



La destrucción de ecosistemas naturales en segunda fase se muestra, de igual manera, porque la sedimentación en el sur y la erosión del norte del puerto de Salaverry han causado la destrucción de los humedales o "totorales" de Huanchaco como se observa en la imagen satelital de la Figura 9 y en la fotografía mostrada en la Figura 10.

Figura 9. Vista satelital de la destrucción de la humedales o "balsares de totora" por erosión. (Vista Satelital)



Figura 10. Vista en detalle de la destrucción de los humedales o “balsares de totora” por erosión



La destrucción de playas como consecuencia de la erosión ha causado impactos negativos en las playas de Las Delicias, Buenos Aires y Huanchaco, como se ve en las Figuras 11, 12, 13 y 14. El deterioro es evidente y el retroceso de la línea costera de igual manera.

Figura 11. Vista de la playa de Buenos Aires.
Antes del rompeolas de retención de arena en el Puerto Salaverry



Figura 12. Vista de la playa de Buenos Aires.
Después del rompeolas de retención de arena en el Puerto Salaverry



Figura 13. Vista de la playa de Huanchaco antes del rompeolas de retención de arena en Puerto Salaverry.



Figura 14. Vista de la playa de Huanchaco después del rompeolas de retención de arena en Puerto Salaverry



La contaminación

Para hacer el puerto de Salaverry operacional, no solo se ha construido la zona superficial a nivel del mar, sino también se ha dragado para obtener una profundidad adecuada y hacer posible la entrada de los barcos. Este hecho ha causado la eliminación de sedimentos naturales de la marina y el arrastre del fondo que contiene metales pesados como plomo (Pb), cadmio (Cd), zinc (Zn), cobre (Cu), y, cuando hay eliminación, se han dispersado en el medio ambiente acuático, lo que afecta a la agua, arena y fauna (Bocanegra, 2016). La ampliación del rompeolas de retención de arena causó la presencia de metales pesados en el ecosistema marino litoral de Salaverry lo que ha ocasionado movimientos en el lecho inevitables.

La construcción más importante ejecutada para mantener operativo el puerto de Salaverry por el permanente problema de sedimentación ha sido la construcción y expansión sistemática de la arena y mole de retención, lo que ha movilizó más de 90 000 000 m³ de sedimentos que han impactado negativamente en el litoral marino ecosistema. Solo observando los registros anteriores, y después de la construcción del rompeolas, se muestra que los impactos de esta estructura en el área han sido devastadores.

4. Discusión

Las actividades portuarias provocan contaminación ambiental bien sea por mar, aire suelo y subsuelo, en especial los desechos de las embarcaciones de diferentes niveles industriales, y los desechos domésticos, lo que, bajo cualquiera circunstancia, afecta el ecosistema (Tamatey et al., 2019). Varios estudios hacen mención sobre las mismas condiciones que lo originan y sobre la contaminación ambiental de los elementos abióticos como ocurre en el caso del puerto de Salaverry.

En igual medida ocurre en puerto Morín, en el circuito ecoturístico marino costero: puerto Salaverry-Bahía de Guañape (Gutiérrez et al., 2018). La contaminación por desechos orgánicos e inorgánicos es causada por inescrupulosos que ingresan por una vía carrozable desde la carretera panamericana sur hacia la Playa Urripe, Playa Yangas y Playa la Ramada; por granjas cercanas y por personal de las municipalidades de áreas urbanas vecinas, quienes dejan su carga, que es esparcida por los vientos hacia el noreste del litoral de esta zona. Esta situación de contaminación ambiental, por causas antrópicas, ha conllevado a la degradación de algunos ecosistemas de flora y fauna existentes en la zona, tanto en su área continental como en el mar; tal es el caso de los hábitats de gramadales, humedales que son contaminados con vertidos de desechos industriales y urbanos, así como la depredación de la flora. Lo anterior es consistente con los estudios de Ruiz-Santillán et al. (2020), quienes al elaborar un diagnóstico ecológico del humedal Choc Choc en Trujillo, Perú, concluyeron que este presenta severos impactos negativos debido a la actividad antrópica.

La situación no solo se sucede con la contaminación de las playas, que es la más notoria o inmediatamente visible, hay estudios que reportan que la situación también se ocurre en otras latitudes como en Chile, pero a nivel natural donde la erosión ha comprometido severamente las playas y los espacios urbanos (Araos, 2017). También sucede en México, como lo advirtieron Carranza et al. (2015) en su investigación sobre la pérdida de ecosistemas marinos, la cual es significativa porque la pequeña pesca se ve afectada por el desglose de la cadena alimentaria; de igual manera, con estas anomalías han afectado especies y recursos, especialmente en la fase larval y en el reclutamiento. De igual forma, Correa & Vernet (2016) reportaron la pérdida

de parte del litoral costero del Caribe colombiano debida a la erosión, con retrocesos de entre 50 y 100 m, además indican que la construcción de estructuras de contención como espolones solo ha agravado el problema.

Los movimientos de algunas especies se presentan disminuidos, otras especies tienden a incrementar cuando las zonas costeras sufren la intervención humana, tal como lo expresaron Castillo & Huamantínco (2020) al analizar la comunidad de macroinvertebrados acuáticos del humedal costero Santa Rosa, Lima, Perú, donde concluyeron que hay efecto de las actividades de agricultura, ganadería y urbana. Sin embargo, algunas especies son resilientes y su número se conserva a pesar del impacto negativo. La pesca ancestral se ve seriamente en peligro debido a esta modificación porque la erosión destruyó más del 50 % de los estanques o balsares de totora y pone en peligro hasta la cultura de la población, como la pesca artesanal que emplea el caballito de totora (Bocanegra, 2006). En contraste, Rondón & Tavares (2018), al analizar la vulnerabilidad de costera del litoral peruano, estimaron que el 82.9 % tiene vulnerabilidad media y que esta aumenta si se toman en cuenta los cambios físicos, mas no así si se considera la intervención antrópica.

En el otro extremo, la contaminación del ecosistema marino litoral de Salaverry con metales pesados se relaciona con el dragado que tuvo un alto impacto por el aumento de la turbidez del agua y su biodisponibilidad en todo el ecosistema, poniendo en riesgo la salud pública. (Zúñiga, 2017).

En otras zonas también vulnerables, en el caso de México, fue Tabasco, parte central de Veracruz, norte de Yucatán y Quintana Roo, porque estas áreas son playas más bajas en el golfo y Caribe de México. Las líneas de playa fueron analizadas con imágenes satelitales por varios años y sugieren en primera instancia la acción de procesos antrópicos y meteorológicos; estos últimos podrían indicar una conexión entre deposición y erosión de estas zonas en sitios no muy alejadas (Carranza et al., 2015). Todos los estudios anteriores coincidentemente concluyen que la degeneración de las costas ocurre por acciones antrópicas similares.

5. Conclusiones y recomendaciones

El distrito de Salaverry presenta fragilidad en su ambiente y vulnerabilidad en todo el ecosistema, lo cual es una consecuencia asociada a las condiciones físicas naturales de este territorio y a los impactos que se generan a partir de las actividades humanas y de los fenómenos naturales actuales y futuros, así como de los procesos de su dinámica económica productiva existente.

Las acciones antrópicas en el litoral de Trujillo han causado erosión y destrucción en las Delicias, Buenos Playas de Aires y parte de Huanchaco; la costa ha sido modificada también por el cambio de dirección de las corrientes marinas y la erosión en las playas, la cual ocasiona la eliminación y desaparición completa de ecosistemas, debido a que se pierden las seguridades y protecciones naturales. Del mismo modo, los ecosistemas ecológicos de gran importancia como los totorales han sido perturbados y las especies del litoral se han visto afectadas; en consecuencia, se interrumpe la cadena alimenticia del mar, lo que repercute en la disminución de la pesquería local y en la posibilidad de que se incremente el desarrollo turístico sustentable.

Una de las posibles recomendaciones es surtir de 60 000 000 m³ de arena, retenidos en el molón de puerto Salaverry, para que ello amortigüe los efectos de la erosión contra la costa de los balnearios del litoral de Trujillo y para salvar los balnearios de Buenos Aires, Las Delicias y Huanchaco, que se han visto fuertemente afectados por el alto impacto del oleaje registrado en

la costa liberteña. La fabricación del espigón como contenedor no permite el ingreso de arena a las playas, pero la retención ha causado de igual manera erosión costera. Por ello, la posible solución de surtir la arena en el turístico balneario de Huanchaco ha sido momentánea porque ya no queda arenal, debido a que las olas cada vez están más cerca de la avenida y de la vía principal, haciendo que desaparezca la playa y que la franja roja límite siga corriendo.

Es imperante que las construcciones sean regularizadas en estas áreas, pues, a través de una buena planificación en los desarrollos sustentables, se podría lograr un equilibrio y un rescate del ecosistema en general. Se hace necesario también evaluar las obras de defensa costera para evitar que la erosión de la costa siga avanzando, mediante ejecución de espigones que sirvan para alejar de la orilla las líneas de corriente con alta velocidad y evitar así que el material de la margen sea transportado y se erosione. Además, el hecho de crear zonas de agua con corrientes de menor velocidad entre los espigones favorece que los sedimentos se depositen entre ellos, con lo que se logra un efecto adicional beneficioso y necesario para la consolidación del sitio.

Referencias

- Araos, F. (2017). Más allá de la biodiversidad: Aportes de la antropología a la conservación marina en Chile. *Revista Austral de Ciencias Sociales*, 33, 21-35. <https://doi.org/10.4206/rev.austral.cienc.soc.2017.n33-02>
- Bocanegra, G.C. (2016). Impacto del dragado de sedimentos del puerto de Salaverry en el ecosistema marino litoral. *Revista Interdisciplinaria ECIPerú*, 13(2), 62-66. <https://doi.org/10.33017/RevE-CIPeru2016.0009/>
- Bocanegra, G. C. (2006). *Impacto de la expansión urbana sobre la sustentabilidad ambiental del litoral de la Bahía de Huanchaco*. Asamblea Nacional de Rectores. <https://bit.ly/366oAsd>
- Boretto, G. M., Rouzaut, S., Cioccale, M., Gordillo, S., & Benítez, Y. (2018). Dinámica costera y antropización en playas uruguayas: Un análisis integrado para su conservación. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 35(3), 291-306. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2018.3.865>
- Castillo, R. M., & Huamantínco, A. A. (2020). Variación espacial de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos en la zona litoral del humedal costero Santa Rosa, Lima, Perú. *Revista de Biología Tropical*, 68(1), 50-68. <https://doi.org/10.15517/rbt.v68i1.35233>
- Castro, A. (2015). *Erosiones del litoral costero de Trujillo originado por la construcción del molón retenedor de arena del terminal portuario de Salaverry*. <https://bit.ly/3nZn4P0>
- Carranza, A., Márquez A., Tapia, C., Rosales, L., & Alatorre, M. (2015). Cambios morfológicos y sedimentológicos en playas del sur del golfo de México y del Caribe noroeste. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(1), 21-43. <https://doi.org/10.18268/bsgm2015v67n1a3>
- Correa, I. D., & Vernet, G. (2016). Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes-Turbo) costa Caribe colombiana. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 33, 7-28. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2004.33.0.245>
- Cruz, E. V. (2015). *La erosión costera y su influencia en la oferta de servicios del sector hotelero del distrito de Huanchaco 2009-2014* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo]. Repositorio Institucional UNITRU. <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/2139>
- Delshab, H., Farshchi, P., & Keshavarzi, B. (2017). Geochemical Distribution, Fractionation and Contamination Assessment of Heavy Metals in Marine Sediments of the Asaluyeh Port, Persian Gulf. *Marine Pollution Bulletin*, 115(1-2), 401-411. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.033>
- Escudero-Castillo, M., Felix-Delgado, A., Silva, R., Mariño-Tapia, I., & Mendoza, E. (2018). Beach Erosion and Loss of Protection Environmental Services in Cancun, Mexico. *Ocean & Coastal Management*, 156, 183-197. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.06.015>

- Gómez-Robledo, A. (2016). Apuntes sobre delimitación en derecho internacional del mar. *Anuario Mexicano de Derecho Internacional*, 16, 255-300. <https://doi.org/10.22201/ij.24487872e.2016.16.527>
- Grafals, R. (2018). Dunas y procesos costeros en una isla tropical caribeña amenazada por erosión, actividades humanas y aumento del nivel del mar. *Caribbean Studies*, 46(2), 57-77. <https://doi.org/10.1353/crb.2018.0023>
- Guerrero-Padilla, A., Hoyos-Cerna, M., Reyes-Vila, E., Sánchez-Tuesta, L., Cruz-Vásquez, Y.S., & Santillán-Aredo, R. (2013). Impacto ambiental generado por erosión costera en la zona litoral de Buenos Aires Norte, distrito de Víctor Larco Herrera, La Libertad, Perú. *REBIOL*, 33(2), 11-22. <https://tinyurl.com/y5daqnxb>
- Gutiérrez, J. N., Polo, R., & Tomapasca, D. (2018). Circuito ecoturístico marino costero: Puerto Salaverry-bahía de Guañape (La Libertad-Perú). *HAMPIRUNA*, 29(2), 465-493. <http://200.62.226.189/HAMPIRUNA/article/viewFile/1115/1012>
- Jiao, J., & Post, V. (2019). Introduction to Coastal Groundwater Systems. In *Coastal Hydrogeology* (pp. 1-18). En *Coastal Hydrogeology*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139344142.001>
- Khalafallah, A., Almashan, N., & Haleem, N. A. (2020). Port Construction Planning: Automated System for Projecting Expansion Needs. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 146(6), 04020040. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ww.1943-5460.0000603](https://doi.org/10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000603)
- Ianire, G. (2015). *Erosión de suelos y laderas en el espacio agrícola de la Rioja. Aplicación y Cartografía del Modelo Rusle* [Tesis doctoral, Universidad de La Rioja]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=48476>
- Lu, Q., Wang, Z., & Wang, R. (2019). Nash Equilibrium Strategy of Port Construction Considering Seawater Erosion. *Journal of Coastal Research*, 98(1), 330-334. <https://doi.org/10.2112/SI98-078.1>
- Merlotto, A., Verón, E., Sabuda, F. (2008). Riesgo de erosión costera en el balneario Parque Mar Chiquita, provincia de Buenos Aires. *Párrafos Geográficos*, 7(1), 103-121. http://igeopat.org/parrafosgeograficos/images/RevistasPG/2008_V7_1/9-5.pdf
- Palau, A. (2018). *La sedimentación en embalses: Medidas preventivas y correctoras*. Dirección de Medio Ambiente y Calidad. Endesa Servicios, S. L. C. <https://bit.ly/2JevuTe>
- Posada, B. O., & Henao, W. (2008). *Diagnóstico de la erosión costera en la zona costera del Caribe colombiano*. Ivemar. <https://tinyurl.com/y5c3qk7f>
- Rainbow, P. S. (2018). Heavy Metal Levels in Marine Invertebrates. En *Heavy Metals in the Marine Environment* (pp. 67-79). Taylor & Francis Group. <https://bit.ly/2HFgOwc>
- Rainbow, P.S., & Furness, R.W. (2018). *Heavy Metals in the Marine Environment*. Taylor & Francis Group. <https://bit.ly/3m931wG>
- Rivas, L. (2015). *Evaluación de la playa La Puntilla, Santa Fe, con vistas a su manejo integrado* [Tesis de maestría, Universidad de La Habana]. <https://bit.ly/3lfzvV7>
- Rodríguez-Alza, M., García-Siccha, K., Nureña-Zavaleta, C., Palacios-Castillo, A., Quijano-Camacho, C., Santos-Del Aguila, C., Vargas-Álvarez, C., & Vigo-Corea, B. (2016). Análisis de la erosión costera en la playa de Buenos Aires, distrito de Víctor Larco, provincia de Trujillo, La Libertad, Perú. *REFI UPN*, 4(1), 19-31. <https://revistas.upn.edu.pe/index.php/refi/article/viewFile/63/97>
- Rondón, G., y Tavares, C. (2018). Adaptación de un índice de vulnerabilidad costera-IVC para el litoral peruano: Un estudio de caso. *Espacio y Desarrollo*, 31, 33-57. <https://doi.org/10.18800/espacio-ydesarrollo.201801.002>
- Ruiz-Santillán, M. P., Huamán, E., & Mejía, F. (2020). Diagnóstico ecológico del humedal chochoc. *REBIOL*, 39(2), 3-18. <https://doi.org/10.17268/rebiol.2019.39.02.01>
- Sánchez, G., Blas, L., & Chau, G. (2010). *Informe nacional sobre el estado del ambiente marino del Perú*. Ministerio de la Producción. <https://tinyurl.com/y4ckumo8>

- Tamatey, E., Herbeck, J., & Flitner, M. (2019). Selective Adoption: How Port Authorities in Europe and West Africa Engage with the Globalizing 'Green Port' Idea. *Sustainability*, 11, 5119. <https://doi.org/10.3390/su11185119>
- Zúñiga, J. (2017). *Determinación de la pérdida de suelos en la cuenca aportante del embalse Aguada Blanca-Arequipa, aplicando Usle y técnicas geoespaciales* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio institucional. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3072>

Biomass Potential and Kinetics of Drying Model of *Piptocoma discolor* (pigüe) as a Source of Renewable Energy Source in Ecuador

*(Potencial de la biomasa y la cinética del modelo de secado de *Piptocoma discolor* (pigüe) como fuente de energía renovable en el Ecuador)*

Juan Elías González¹, Billy Coronel Espinoza², Viviana Quevedo Tumailli³,
Hernán Uvidia Cabadiana⁴, Deny Oliva M.⁵, Carlos Jesús Morón⁶, Morillo Robles Campo⁷

Abstract

The importance of *Piptocoma discolor* is a predominantly fast-growing native species of secondary forest ideal for a sustainable forest due to its predominance in the Amazon of Ecuador and Latin America. Currently it is wood and its waste does not have an alternative to produce electricity. Scarce information on its biomass potential and energy value. The objective was to obtain fresh biomass and drying kinetics, we worked in the four cantons of the Pastaza province with 20 plots of 400 m² and 600 m² that had an average of 15 to 20 trees, whose chest height diameters ranged from 10 and 33 cm., Establishing the following values: a) Average number of trees per hectare (1274 NA2/ha); b) Biomass in 100 987 hectares with an average of 41 097 686.87 tons, which means that it contributes with 49.72 % of water and 50.28 % of solid matter; c) A kinetic model of R² = 0.9855, the estimate of a = 1.1318, k = 0.0637765, n = 0.560617 and b = -0.193993, based on a standard error of 0.0301682 and residual autocorrection of 0.182239 on drying kinetics; and d) Total energy means more than 13.5 GW of thermal energy using 100 % biomass.

Keywords

Biomass, renewable energy source, biofuel, *Piptocoma discolor*.

Resumen

*El *Piptocoma discolor* es una especie nativa de bosques secundarios y de crecimiento rápido ideal para un bosque sustentable por su predominancia en la Amazonía del Ecuador y de América Latina. Actualmente, esta madera y su desperdicio no se consideran como una alternativa para producir energía eléctrica. La información sobre su potencial de biomasa y valor energético es escasa. El objetivo fue obtener biomasa fresca y conocer la cinética del secado. Se trabajó en los cuatro cantones de la provincia de Pastaza con 20 parcelas de 400 m² y 600 m² que tenían un promedio de 15 a 20 árboles, cuyos diámetros de altura del pecho oscilaban entre 10 y 33 cm, y se establecieron los siguientes valores: a) Número de árboles por hectárea promedio (1274 NA2/ha); b) Biomasa en 100 987 hectáreas con un promedio de 41 097 686.87 toneladas, lo que significa que contribuye con 49.72 % de agua y 50.28 % de materia sólida; c) Un modelo cinético de R² = 0.9855, la estimación de a = 1.1318, k = 0.0637765, n = 0.560617 y b = -0.193993, basado en un error estándar de 0.0301682 y autocorrección residual de 0.182239 de la cinética de secado, y d) Energía total significa más de 13.5 GW de energía térmica utilizando 100 % de biomasa.*

Palabras clave

*Biomasa, fuente de energía renovable, biocombustible, *Piptocoma discolor*.*

- 1 Universidad Estatal Amazónica. Pastaza, Ecuador [jgonzalez@uea.edu.ec, https://orcid.org/0000-0002-0674-7741]
- 2 Universidad Estatal Amazónica. Pastaza, Ecuador [bcoronel@uea.edu.ec, https://orcid.org/0000-0003-2389-575]
- 3 Universidad Estatal Amazónica. Pastaza, Ecuador [vquevedo@uea.edu.ec, https://orcid.org/0000-0001-8278-3632]
- 4 Universidad Estatal Amazónica. Pastaza, Ecuador [huvidia@uea.edu.ec (H.U.) https://orcid.org/0000-0002-2961-6963]
- 5 Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría". Habana, Cuba [deny@ceter.cujae.edu.cu, https://orcid.org/0000-0001-8117-3605]
- 6 Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría". Habana, Cuba [cjesus@ceter.cujae.edu.cu]
- 7 Escuela Superior Politécnica del Ejército. Ecuador [ingcampo@hotmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9551-2599]

1. Introduction

For Ecuador, the potential of biomass facilitates its contribution to the energy matrix and represents an important challenge for the scientific community (Gaibor-Chávez et al., 2016). The potential of forestry biomass requires the establishment of suitable techniques for its use, as described in Article 21 of the country's Forestry Law (Ley Forestal y de Conservación de Áreas Naturales y Vida Silvestre, 2004). Mexico has pledged to reduce greenhouse gas (GHG) emissions by 22 % by 2030 and they have managed to mitigate emissions with clean energy production through international agreements (Colegios de Ingenieros Ambientales de México, 2017). In order to evaluate biomass, we created an inventory by employing logistic regression methods, Landsat TM images, topographic information and variables derived from the Forest Map (García-Martín et al., 2006). We quantified the dendrometric variables with technological advances and for the drying process, we used proven models such as Midilli and Page, which were also adopted for estimating citrus biomass (Velázquez-Martí et al., 2016). Other investigators judge that the drying rate must be adjusted in relation to time and temperature, and that one must determine the reduced moisture content (RMC), which contributes to models particular to each species. (Umaña-Calderón et al., 2019). Another exhaustive quantification and characterization of the products is by means of analyzing physical, chemical and energetic properties with a direct or indirect link to the drying process (Montero Puertas, 2005). The kinetics of drying is a process that encompasses four stages of humidity removal by convection (Gómez de la Cruz, 2015).

The fresh shrub biomass analysis techniques allow for the calculation of apparent volume for mathematical, cylindrical and parabolic models (dm^3 or m^3), and allow for the determination of amount of biomass (Velázquez-Martí et al., 2010). With these models, the potential of citrus biomass is also assessed (Velázquez-Martí et al., 2012). Humidity was evaluated using the gravimetric method with respect to the dry weight (free of humidity) of the wood's dry biomass (Córdoba, 2005). In Ecuador, there is little information on the subject in available forest inventories. In October 2010, fieldwork was performed in Andean and Amazonian dry forests and in 2012, the forest inventory survey was carried out with random sampling of all types of forest in the nation's territory (MAE, 2015). The inventory of *Piptocoma discolor* and the determination of its fresh biomass potential in forests according to the diameter at breast height (DBH) in the secondary forest of Mera canton, Pastaza province (Merino, 2010). Currently, the forestry species are dried by the forest's atmosphere (Salinas et al., 2019). It is necessary to utilize this plant, because it is a pioneer species of the early and late secondary forest of the Amazon Region. (Merino, 2010). It is used as an energy crop, due to its rapid and natural growth (González et al., 2018). A Softwood tree that reaches a maximum height of 30 m, its trunk diameter is approximately 60 cm, is cylindrical and has ramifications above the lower third. This herbaceous plant has well-formed straight branch stubs and flaky, grayish cracked bark. It boasts natural regeneration, which allows it to repopulate the secondary forests of the Amazon Region. (Vallejo, 1982). It grows at different altitude levels (500 to 1500 masl) at an average temperature of 20 °C and covers a radius of 25 to 30 km from Pastaza province. (Merino, 2010). As a species native to the Amazon Region (Erazo et al., 2014), it is associated with forestry calculations and its biomass potential predominates over the Ecuadorian Amazon Region's other natural resources (Forest Carbon, 2014). It is produced in an associative way with other species of greater relevance in the area (Hurtado & Guayara, 2013). and the annual production volume is 8754 m^3 (MAE, 2009). This study deals with the potential of fresh and dry forestry biomass as a Renewa-

ble Energy (RE), due to its natural replacement (Unión General de Trabajadores, 2016). Biomass models in recent years have increased and the most commonly used are models of regression and combination of variables, because they correlate most adequately for forest inventories (Fonseca et al., 2009).

The study was carried out *in situ*, because there are two methods: direct and indirect. The former is destructive and consists of cutting the tree to weigh the components and the latter consists of measuring tree volume (Fonseca et al., 2009), in order to determine the fresh and dry biomass potential of *Piptocoma discolor*. A model was created to estimate the secondary forest's biomass production using individual volumes, with averages of height and weight in relation to the volumetric equation for truncated cones (Aristizábal, 2011). The kinetics of drying was examined by eliminating moisture from the wood, which varies between 25 and 50 % with respect to its initial weight and does not undergo appreciable changes for treatments and industrial uses (Fogila, 2005). For the production of steam, a humidity of 10 (% H) is required as an optimal value for renewable energy generation (Arroyo-Vinueza et al., 2016).

2. Materials and Methods

2.1. Study Area

The study was carried out in four cantons in the province of Pastaza, namely Arajuno, Mera, Santa Clara and Pastaza. Altitude ranged from 550 to 960 m above sea level, with relative humidity rates between 80 and 90 %, and an average temperature of 22 °C (Quezada, 2013). This information is based on the meteorological data of the area. We selected areas of interest in the secondary forest in relation to species, (Murillo & Camacho, 1998), and then proceeded to gather information (Ministerio de Ambiente, Proyecto Manejo Forestal Sostenible ante el Cambio Climático, & Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [MAE et al.], 2014).

SAMPLING METHOD

The sampling method applied was by means of stratification. We randomly selected extensions of 1 to 2 ha, with 12 plots of 400 m² and 8 plots of 600 m², in vegetation areas of *Piptocoma discolor* (MAE et al., 2014), and another extension with 5 plots with densities of 15 to 20 trees (Murillo & Camacho, 2013). This was carried out in the four cantons of Pastaza province (Figure 1).

The experimental study was carried out using criteria of diameters and categorization of the raw material using the following classification and including 3 trees per category: first (10-15 cm); second (16-21 cm); third (22-27 cm); and fourth (28-33 cm). 12 trees per canton were chosen, giving a subtotal of 48 trees of the 600 trees studied, with similar morphological characteristics (Escoto García et al., 2017).

Figure 1. Location of the Plots of *Piptocoma discolor*



a. Location of the plots

b. Tree species

An average of 25 geographical points (latitude, longitude and altitude) were selected in each canton, with GPS. Diameter was measured with forestry caliper lengths and widths of the plots with tape measure. We proceeded *a priori* to apply two methods of direct and indirect weighing, which allowed us to determine weight of logs. Lastly, tree samples were obtained in relation to amount of biomass, which was on average 3 kg per log and had a total of 36 kg per canton. Subsequently, the biomass was dried (Romahn & Ramírez, 2010). for optimization and representativeness, according to the method proposed by Hapla and Saborowski (1984), and for the determination of the sample size, we utilized equation 1 (Fernández-Puratich & Oliver-Villanueva, 2014).

$$IM = \frac{n}{N} * 100 \quad (1)$$

where:

IM = Intensity of trees for estimating forestry biomass

n = Number of trees per plot

N = Tree population per hectare

To define the existing biomass potential in the four cantons in the province of Pastaza, the following formula was utilized:

$$Wt = \frac{Wp}{\bar{A}} * \frac{NA_2}{Ha} \quad (2)$$

where:

W_t = total biomass weight (kg/ha).

W_p/\bar{A} = average weight (kg/tree).

NA_2/ha = number of trees per hectare

METHOD FOR THE FOREST INVENTORY

The method used was low-intensity destructive allometry, which allowed is to estimate the biomass by regression analysis with the use of mathematical equations in relation to the biomass and the measurements of the woody vegetation at the feet of the trees for quantitative variables (DBH, commercial height, total height, basal area, mass and volume (Cancino, 2002). This was mainly intended for the calculation of plant biomass (Riofrío et al., 2006). and volumetric analysis (MAE & Ecuador, 2015).

THE ASSESSMENT FOR QUANTIFYING BIOMASS POTENTIAL

Mathematical models by Huber, Smalian and Newton (Cancino, 2010). were used for the volumetric quantification of fresh and dry biomass of shrubby plant species.

Tree volume was measured in relation to the volumetric equation for truncated cones:

$$V = \frac{\pi(R^2+r^2Rr)*h}{3} \quad (3)$$

where:

V = volume of branch stub (m^3).

R^2 = major square of the radius (m^2)

r^2 = lesser square of the radius (m^2)

Rr = major square multiplied by lesser square (m^2)

h = height of branch stub up to the apparent superior diameter (m)

For tree simulation and biomass potential simulation, the Autodesk Inventor Professional 2017 software was used. Based on the indicated data of the inventory and what equation 2 validates, the program simulated the tree and calculated the fresh biomass potential.

BIOMASS DENSITY

The quantification and estimation of the biomass potential, according to the diameters of the base and of the final branch stub, was considered for measuring the allometric method and branch diameters etc., which allowed us to establish biomass potential (Álvarez et al., 2013).

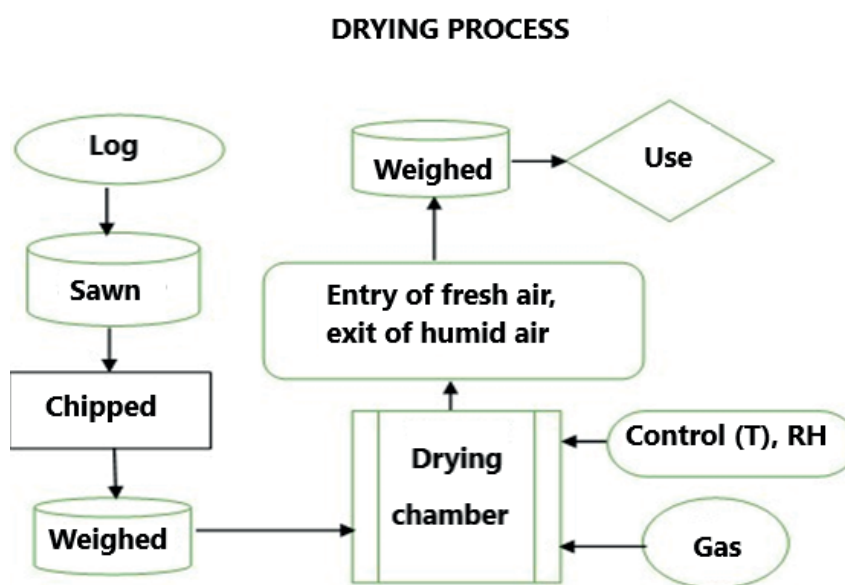
$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{kg}{m^3} \quad (4)$$

2.6. Drying the Biomass

3 kg of samples without bark were extracted from three sections of the tree log, from the base to the final branch stub of the tree (lower, intermediate and upper) in order to perform a homogeneous mixture and obtain complete information about the tree. Drying was achieved at room temperature (25°C) in the Pastaza canton. The time taken to air-dry the samples was 15 days and oven drying occurred at 120°C to achieve wood shavings that were 2 to 3 cm thick (Calderón & Solis, 2012).

To dry the samples, they were taken to an American Range industrial oven automated with a temperature regulation of ± 5 °C. The oven was set at a relative humidity of 90 % (% RH) and at a temperature of 120 °C. In order to examine the aforementioned samples according to their length and control the humidity at different times (0, 20, 50, 110, 170 and 200 min), the weight of each sample was checked using Pioneer digital analytical scales with an accuracy of 0.001 g until the samples reached a constant weight.

Figure 2. Diagram of Relative Humidity Removal



The experimentation considered 6 time periods and with 3 replicas, giving a total of 18 experimental runs, with samples weighing 2 kg. They were placed in trays inside the industrial oven for drying, which was carried out with the COPANT-wood standard 458 and its methodology (Garay y Henriquez, 2012). as shown in Figure 2 of the drying system.

2.7. Moisture Determination

The fresh sample was immediately weighed and the relative humidity of 90 % was determined, according to Chilean standard NCh176/1 (1984). The following formula for the initial moisture of the fresh wood was applied.

$$CH = CH_{Fresco} - W_{H2O} / W_{fresco} \quad (4)$$

The pre-dried samples were placed on plastic tarpaulins to be later taken to the stove based on ASTM D 346-04 International Standards.

2.8. Modeling of Kinetics of Drying

The model was created, as visualized in Figure 2, with an industrial furnace that has a ventilation system that allows one to control temperature and time with tests of temperature ranges of $\pm 5^\circ$, and has a permanent gas supply generating uniform heat according to the temperature,

time and particle size. Water evaporated towards the surface and it was possible to identify the presence of two zones with hygroscopic domain, where the migration of humidity was governed by the diffusion of steam and liquid water. In the inner area, free water migrated by capillarity and the decreasing drying rate implied the start of an evaporation front below the surface, which moved to the center of the wood and was removed out of it (Ananías y Venegas, 2005).

The kinetics of drying are characterized by a curve based on the dimensionless parameters $f(\text{CHR})$ and CHR . Thus, the speed of drying represents the water removal ratio (Wan Noor et al., 2014), and the methods of solar drying in open and closed systems, such as industrial furnaces (Sunil y Ajaygiri, 2015).

$$\Phi = f(\text{CHR}) \cdot \Phi_{\text{Max}} \quad (5)$$

Con $f(\text{CHR}) = 1$ if $\text{CH} > \text{CHC}$ or $f(\text{CHR}) = \text{CHR}$ if $\text{CH} < \text{CHC}$.

The content of reduced humidity CHR is defined as follows:

$$\text{CH} = \text{CHC}_{\text{Fresh}} - W_{\text{H}_2\text{O}} / W_{\text{W Fresh}} \quad (6)$$

$$\text{CHR} = \frac{\text{CH} - \text{CHE}}{\text{CHC} - \text{CHE}} \quad (7)$$

where:

CH = moisture content at any time (g water / g dry solid)

CHC = moisture content (g water / g dry solid)

CHE = the equilibrium moisture content of the sample (g water / g dry solid).

The drying curves obtained for *Piptocoma discolor* are based on the proposed new model, as shown in Table 1, where the maximum speed Φ_{MAX} is calculated.

The equilibrium moisture determination (%) was determined using the Hailwood-Horrobin equation and the Simpson constants (Siau, 1984). depending on the temperature (T) of the dry bulb, and the relative humidity (RH) using a hygrometer (Molina Aiz) taking into account the conditions of the Ecuadorian Amazon Region.

$$\text{CHE} = \frac{1800}{K_3} \times \left[\frac{K_1 \times K_2 \times \text{HR}}{1 + K_1 \times K_2 \times \text{HR}} + \frac{K_2 \times \text{HR}}{1 - K_2 \times \text{HR}} \right] \quad (8)$$

where:

CHE : Moisture Content in Balance with the Environment.

HR : Relative Humidity of 87 %. Obtained using a hygrometer.

K_1, K_2, K_3 : Constants determined by Simpson (Siau, 1984), depending on the temperature.

$K_1 = 4.737 + 0.0477 * T - 0.0005 * T^2 = 5.681$

$K_2 = 0.7095 + 0.0017 * T - 5.5534 * 10^{-6} * T^2 = 0.753$

$K_3 = 223.385 + 0.694 * T + -0.0185 * T^2 = 257.327$.

The equilibrium moisture content according to Broche et al. (2002) y Bruce (1985). for this purpose is intended to test the following mathematical models and we adjusted it to the reality of the experimentation of the kinetics of drying, which is related to the reduced moisture

content (RMC), temperature, time and weight of the mass, according to Table 1, for drying *Piptocoma discolor* in Ecuadorian Amazon conditions of Ecuador.

Table 1. The most commonly used mathematical models in kinetics of drying for forestry biomass

Name	Model	Reference
Henderson & Pabis, modified	$MR = ae^{-k_1t} + be^{-k_2t} + ce^{-k_3t}$	(Midilli, et al., 2002)
Midilli-Kucuk	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	(Ananías & Venegas, 2005).
Wang-Singh	$MR = at^2 + bt + 1$	(Sebastián et al., 2010)
Newton	$MR = \exp(-kt)$	(Chen et al., 2012)
Aidawati	$MR = a \exp(-kt^n) + b$	(Henderson, 1974)

The parameters a, b, c, k1, and n are coefficients of the models.

We decided to utilize Aidawati's mathematical model of the kinetics of drying with data about the species that has allowed the experiment to be validated. The authors of this work consider that the models based on individual elements are still marginalized. It should be noted that the drying mechanisms must have regulators of the basic parameters to obtain a drying mechanism that must be applied during the elimination of moisture and obtain a biomass that guarantees combustion and a constant calorific value.

2.9. Statistical Analysis of Fresh and Dry Biomass Potential

Descriptive statistics were applied for fresh biomass based on information from GPS points and tree count based on DBH, experimental plots and the MAE (Ministerio de Ambiente) database, total landowners and number of hectares of the province in use of the secondary forest according to the information *in situ*. And for mathematical modeling, in the kinetics of drying, we worked with the data of dry biomass weight and inferential statistics were applied by comparing and adjusting the models by regression of exponential and polynomial equations. The data of the indicated variables were processed in the statistical program STATGRAPHICS Centurión, version 16.0.0.C (Gutiérrez Pulido y Salazar, 2008). In this way, the validity of the adjustment and development of the mathematical model has been demonstrated.

Results

3.1. Potencial of Available Biomass

Table 2 shows the dendrometric parameters of *Piptocoma discolor* in the plots of the four cantons. It can be observed that in the DBH categories of 4 to 9.9 cm and 22 to 27.9 cm, similarity was apparent in number of trees.

Table 2. Average diameters of trees in secondary forest plots, province of Pastaza

Details		Diameter (cm)			Height (m)		
DCH (cm)	N.º of Trees	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max
4 a 9.9	252	7.2	4.2	9.7	11.6	8.0	14
10 a 15.9	698	12.8	10.0	15.6	17.4	14.0	19.4
16 a 21.9	156	17.3	16.4	18.5	19.7	19.5	20
22 a 27.9	228	22.9	21.8	24.5	22.8	20	28.5
28 a 33.9	108	30.5	28.0	33.0	28.5	28.5	28.5
Total	1442	18.17	16.08	20.26	20.03	18.00	22.08

We recorded results in Table 3 regarding average diameters and weight of trees that were extracted to analyze biomass potential with commercial characteristics and non-commercial characteristics with industrial uses.

Table 3. Design of experiments to obtain samples of the biomass inventory in the province of Pastaza

DBH (cm)	N.º of trees	Diameter of tree		Length of tree (m)		Total length (m)	Weight (kg)		
		Lower base (cm)	Final upper (cm)	Commercial	Not useful		Commercial	Not useful	Total Weight
10 a 15	12	13.25	9.01	10.76	5.22	15.98	54.63	15.43	70.08
16 a 21	12	18.33	13.52	8.83	6.93	15.75	116.89	46.82	163.73
22 a 27	12	23.82	15.77	12.05	7.58	19.79	210.47	54.42	264.92
28 a ≥ 33	12	30.14	24.55	11.88	12.04	23.93	577.42	207.09	784.53
Average	48	21.39	15.71	10.88	7.94	18.86	239.85	80.94	320.81

Table 4 presents results concerning information about the investigation of the forest resource *Piptocoma discolor* and a difference in the estimation of biomass potential.

Table 4. Analysis of biomass potential in the plots of *Piptocoma discolor*, province of Pastaza

Canton	Weight kg/tree	N.º of plots /ha	Area (m ²) plot/ha	N.º of trees per plot	N.º of trees per ha	Total Weight kg/ha
Pastaza	287.33	4	2400	46	767	220 286.3
Arajuno	384.67	4	2400	60	1000	384 670.0
Mera	261.98	4	2400	58	967	253 247.3
Santa Clara	346.60	6	3200	126	2363	818 842.5
Total/Average	320.15	18	10400	73	1274	419 261.5

By incorporating the number of populated hectares of *Piptocoma discolor* in the 4 Cantons studied, it was possible to obtain a biomass production potential for each canton (Table 5).

Table 5. Total biomass potential for *Piptocoma discolor* in the province of Pastaza

N.º	Canton	Total Weight (kg/ha)	N.º (ha of <i>Piptocoma discolor</i>)	Subtotal (kg of <i>Piptocoma discolor</i>)	Total Weight (ton of <i>Piptocoma discolor</i>)
1	Pastaza	220 286.30	44 879.00	9 886 230 353.67	9 886 230.35
2	Arajuno	384 670.00	13 461.00	5 178 042 870.00	5 178 042.87
3	Mera	253 247.30	15 714.00	3 979 528 596.00	3 979 528.60
4	Santa Clara	136 560.40	26 933.00	22 053 885 052.50	22 053 885.05
	Total	1 677 046.20	100 987.00	41 097 686 872.17	41 097 686.87

Figures indicate that more than 13.7 million tons of fresh *Piptocoma discolor* matter has the potential for industrial use. Non-usable wood for energy purposes came to 3.7 million tons. These are properties of the species' biomass potential (Table 6).

Table 6. Usable and non-usable biomass potential of *Piptocoma discolor*

Canton	Total of Fresh Matter (ton)	Trees	Branches	Trees	Branches
		Usable Wood (ton)	Non-usable wood (ton)	Usable (%)	Non-usable (%)
Pastaza	2 475 857.74	1 899 725.64	576 132.10	76.73	23.27
Arajuno	1 294 510.72	933 471.68	361 039.04	72.11	27.89
Mera	9 996 255.03	7 985 008.52	2 011 246.51	79.88	20.12
Santa Clara	3 677 981.25	2 882 066.12	795 915.13	78.36	21.64
Total	17 444 604.74	13 700 271.96	3 744 332.78	78.54	21.46

Unlike Spain, other species in forests for wood and daily consumption are imported from abroad (Martínez, 2009). Production is differentiated in the secondary forest, as this is a pioneer species in the province of Pastaza and the Amazon Region of Ecuador.

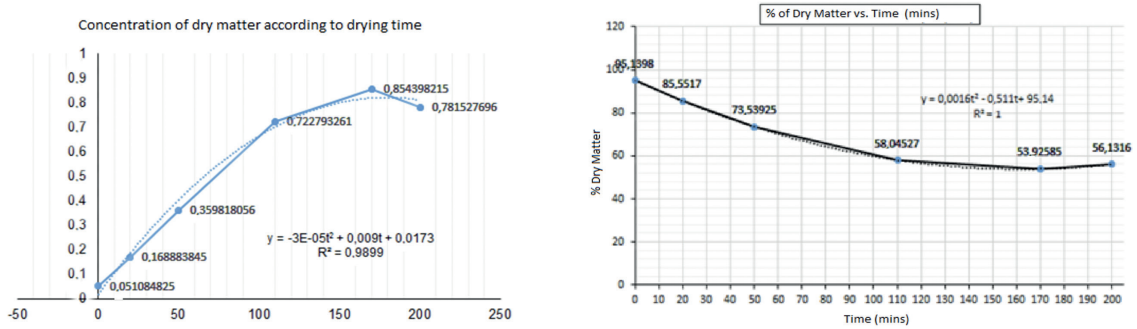
3.2. Dry Matter as a Source of Energy

The total raw material of *Piptocoma discolor* is 41 097 686.87 metric tons. 50.28 % of dry matter is equivalent to 20 124 108.68 metric tons and 49.72 % of water, with 20 973 578.20 metric tons remaining, which is added to the secondary forest which contributes to the Ecuadorian Amazon Region. An amount of 17 444 604.74 metric tons of *Piptocoma discolor* per year can be extracted from the forest, leading to a potential of 129 992.71 metric tons per month. This figure represents a considerable amount in terms of energy potential; it is around 13.54 GW of thermal and about 3380 MW of electric energy.

3.3. Kinetics of Drying by Convection

The result of the fresh biomass of *Piptocoma discolor* is represented by a solid phase (hemicellulose, cellulose and lignin), a liquid phase (water) and a gas phase (air and water vapor) of the porous structure of the wood. By analyzing the proportions and understanding the isothermal mechanism of drying, experimental calculations and biomass ratios of *Piptocoma discolor* trees were established in the drying process (Figure 3).

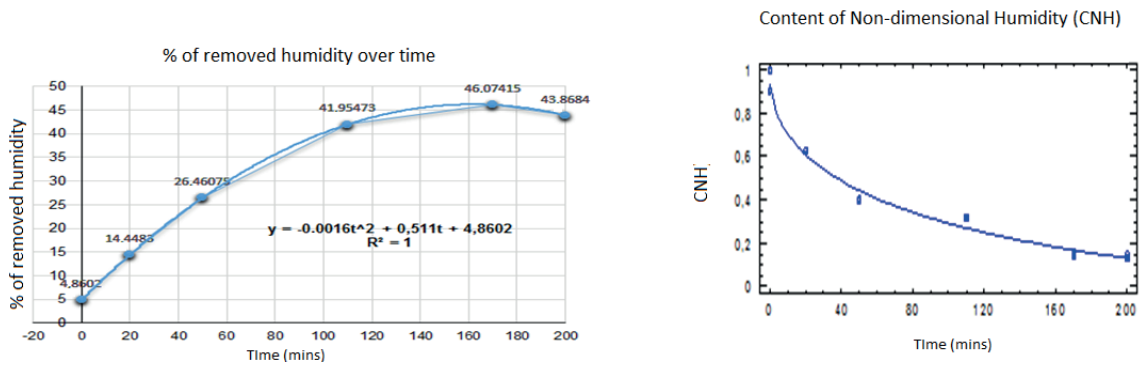
Figure 3. Behavior of the Drying Stages of *Piptocoma discolor* Wood: a and b



The gravity or density was 0.759 g/cm³ in fresh matter and 0.560 g/cm³ in dry matter, the fraction of the porosity of the moisture of the initial sample was 0.12 and humidity removed was 0.43. According to the proposal for centimeter cubed of *Piptocoma discolor*, the humidity content was 7.28 %. In the drying isotherms, the air entering the empty spaces tended to remove the water towards the surface, as outlined by (Wan Noor et al., 2014).

The four stages of removal of total humidity are shown in Figure 4.

Figure 4. Stages of Humidity Removal and Reduced Moisture Content (RMC)

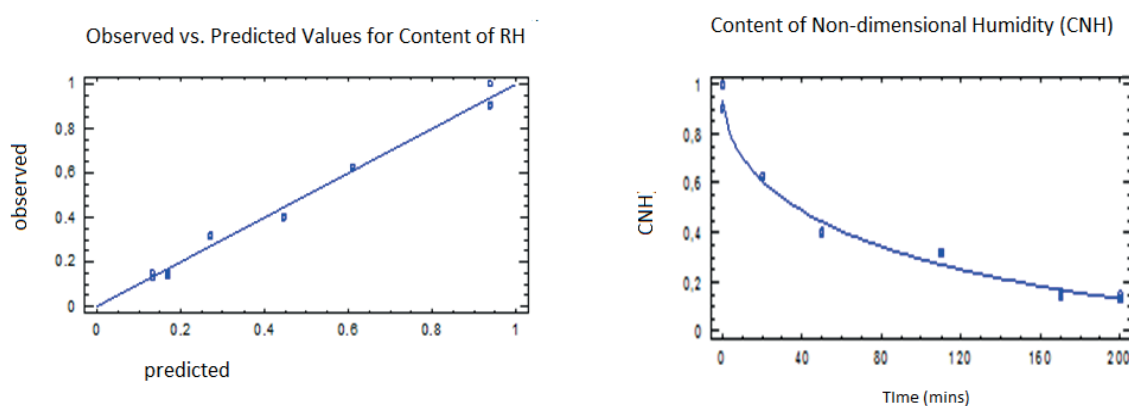


This kinetics of drying fulfils the four stages, as shown in Figure 4. Changes or behavior occur where the drying period is completed. The portion is decreasingly separated in the period AB and lower portion in the period BD. The portion goes down and gets further away for the first period (BC), and the second portion goes down in the period CD, as mentioned in the literature (Treybal,1988). It is necessary to remove some temperatures and the water molecule present in the wood is confidential in these free water molecules (Dengyu, et al., 2012). Drying takes advantage of the zero portion when the resistances of water molecules conduct strongly (Treybal,1988).

Table 7. Characteristics of the evaluation of drying curves

Model Parameters						
Model	Temperature	A	B	K	n	R2
Wan-Singh	30	0.0000315	-0.01199			0.8965
Henderson-Pabis	30	1.016		0.03065		0.9984
Midilli-Kucuk	30	0.9931	1.466E-05	0.02055	1.104	0.9988
Wan Noor	30	0.9898	0.00291	0.02038	1.107	0.9988
	45	1.015	0.003993	0.036	1.072	0.9999
Proposed Model	120	1.13E+00	-1.94E-01	0.0637765	0.56062	0.9855

Figure 5. Observed vs. Predicted Relative Humidity (RH) and Non-dimensional Humidity; a and b

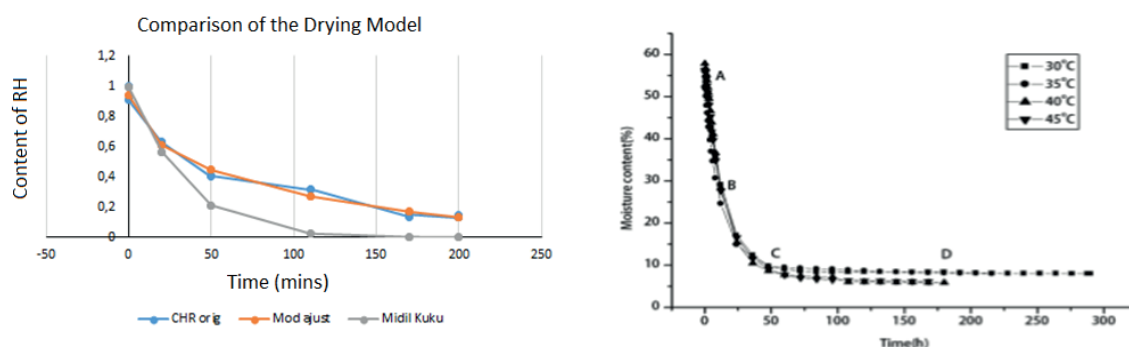


The biomass of *Piptocoma discolor* reaches 79 % of the total water removed at 120 °C during the time period of 170-200 mins with an average 170.53 mins. Portion prediction models were in accordance with experimentation and point information.

3.3. Comparison Kinetics of Drying

The results of the statistical analysis model in Table 7 and Figure 5 are considered to be the experimental drying at a temperature of 120 °C. This is, as an example, appropriate for comparing a model in order to demonstrate Midilli-Kucuk's model, as opposed to the other closed models indicated in the above table and according to the drying curves detailed below.

Figure 6. Comparison of kinetics of drying model with Midilli-Kucuk; a and b



The new model of kinetics of drying has a similarity to what Wan Noor found, based on the statistical analysis and parameters (a, b, k, and n value). When studying the different times and constant temperature, the proposed model and result of the variance R² of the residual model, whose value was 0.9855, we found the following: estimated a = 1.131, k = 0.0637765, n = 0.560617 and b = -0.193993, based on a standard error = 0.0301682 and residual autocorrection = 0.182239 respectively. This was produced properly and compared to other models that describe the characteristics of *Piptocoma discolor* in its hydrating behavior of 2.16 % and its humidity, which is due to the conditions of the Amazonia Region.

Proposed Model

$$\text{CHR} = a \exp(-ktn) + b.$$

Discussion

The biomass potential of *Piptocoma discolor*, due to its abundance and climatic characteristics and dominance over other species, makes its predation difficult compared to others. Tables 4 and 5 present the results that were obtained by direct methodology *in situ*, unlike similar studies conducted by indirect methods that reached an average of 0.47 t ms / ha per year (Dengyu, et al., 2012). In this case, the high forestry dominance of *Piptocoma discolor* provides better alternatives for management and its use, as well as for energy purposes, because the extraction rate must be adequate. One cannot use all the wood for this purpose, since one must also try to maintain the species' vigor and secondary forest sustainability (Spitler, 1995). Other investigations carried out in the Ecuadorian Amazon Region determined that the revegetation was qualified as excellent at 96.8 % and acceptable at 86.3 % (Domínguez, 2011). This is due to the quality of biodiversity and to *Piptocoma discolor* itself (Murillo & Camacho, 1997). One of the reasons why people are so eager to boost the production of *Piptocoma discolor* is its rapid and natural growth in comparison to other species, so the interest of industrial exploitation is justified. In Argentina, the *Cabrelea canjerana* species grows naturally due to the light that reaches the undergrowth and has a high ecological and timber value (Moretti et al., 2019). The comparative advantage of our country with respect to others, such as Spain, is the climatic and edaphic conditions for production (Martínez, 2009). According to these analyses of *Piptocoma discolor*, there is still no other species that predominates over the Amazon Region and it is our interest to carry out an industrial process for energy purposes.

The behavior of the drying stages and the drying isotherms, as seen in Figures 3 and 4, defined and predicted the biomass portions (Martínez, 2009). and this agrees with studies regarding type of humidity (Dengyu, et al., 2012). obtaining a dry biomass with a density of 0.560 g / cm³ and achieving a 43 % removal of humidity that was removed to the surface (Wan Noor et al., 2014). Wood is a heterogeneous, anisotropic, porous and unsaturated material, as discussed by Turner and Mujumdar (1997). From the point of view of drying, humidity is altered in relation to the equilibrium of the environment, in which numerical and statistical methods intervene, as proposed by mathematical models (Salinas et al., 2004).

The kinetics of drying systems with open and closed models were compared. The characteristics of *Piptocoma discolor* in Amazonian conditions resulted in a relative humidity of 80 and 90 %, and average temperature of 22°C (Quezada, 2013; Murillo & Camacho, 1998). based on the standard COPANT-woods 458 (Garay y Henriquez, 2012). This allowed us to obtain our own

mathematical model for the species through the use of some models and their comparison with a kinetics of drying model similar to that of Midilli-Kucuk a and b 458 (Garay y Henríquez, 2012).

Due to the humidity of the Amazon Region, constant measurements of kinetic parameters must be carried out for its industrial use and to guarantee the production of renewable energy with a reliable potential of Gw in electrical terms.

Conclusion

The secondary forest where *Piptocoma discolor* is the most abundant. It delivers a biomass potential of 41 097 686.87 tons per year over 100 987 hectares. This reflects its contribution in fresh and dry biomass.

The Autodesk Inventor Professional 2017 software and equation 2 of the mathematical model of truncated cones allowed us to determine the biomass potential, as demonstrated in Table 3 and 4, due to the species' dominance against other Amazonian species.

The analysis of the kinetics of drying of the *Piptocoma discolor* biomass obtained its own mathematical model in Amazonian conditions that presented different characteristics to the Midilli-Kucuk in terms of values and its humidity stages, which are similar to what Wan Noor found in other species.

In energy terms, this represents a potential of 13.54 GW electric thermal, which could help meet the electrical demands of difficult-to-access areas in the Amazon Region.

References

- Álvarez, E., Benitez [sic], D., Velásquez, C., & Cogollo, A. (2013). Densidad básica del fuste de árboles del bosque seco en la costa Caribe de Colombia, *Intrópica*, 8(1), 17-28. <https://doi.org/10.21676/23897864.729>
- Ananías, R. A., & Venegas, R. (2005). Secado industrial del pino radiata: Tiempo de esterilización con calor y evolución temporal de la temperatura. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 7(3), 179-188. https://www.redalyc.org/pdf/485/Resumenes/Abstract_48507303.2.pdf
- Aristizábal, J. D. (2011). Desarrollo de modelos de biomasa aérea en sombríos de cafeto (*Coffea arabica* L.) Shade Trees Via Simulated Data. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.*, 14(1), 49-56. <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v14n1/v14n1a07.pdf>
- Arroyo-Vinueza, J., & Reina-Guzmán, W. S. (2016). Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor. *Ciencia y Tecnología*, 16, 1-10. doi: 10.17163/ings.n16.2016.03
- Broche, W., Ananías, R., Salinas, C., & Ruiz, P. (2002). Modelación del secado convencional del coigüe: Parte 2. Resultados experimentales. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 4(2), 69-76. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2002000100006>
- Bruce, D. M. (1985). Exposed-layer Barley Drying: Three Models Fitted to New Data up to 150C. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 32(4), 337-348. doi: 10.1016 / 0021-8634 (85) 90098-8
- Calderón, D., & Solís, D. (2012). Cuantificación del carbono almacenado en tres fincas en tres estados de desarrollo del bosque de pino (*Pinus oocarpa*, L.) Dipilto, Nueva Segovia, Nicaragua [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio institucional. <https://repositorio.una.edu.ni/1158/1/tnk10c146.pdf>
- Cancino, J. (2002). Crecimiento. En *Dendrometría básica*. <https://bit.ly/3gdyV9e>
- Cancino, J. (2010). *Dendrometría básica (Determinación de volúmenes de árboles)*. https://www.academia.edu/28227698/Dendrometria_Basica

- Colegio de Ingenieros Ambientales de México. (2017). *Evaluación del potencial de la biomasa como parte de la matriz energética de México*. <https://bit.ly/3mNIE8M>
- Córdoba, R. (2005). Conceptos básicos del secado de la madera. *Forestal Kurú (Costa Rica)*, 2(5), 88-92. <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/546>
- Dengyu, C., Li, M., & Zhu, X. (2012). TG-DSC Method Applied to Drying Characteristics and Heat Requirement of Cotton Stalk During Drying. *Heat and Mass Transfer*, 48(12), 2087-2094. doi:10.1007/s00231-012-1050-6
- Domínguez. (2011). *Evaluación del área reforestada y revegetada en el campo petrolero secoya, cantón Lago Agrio, provincia de Sucumbíos* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. DSpace ESPOCH. <https://bit.ly/3ggq0J1>
- Erazo, G., Izurieta, J., Cronkleton, P., Larson, A., & Putzel, L. (2014). Manejo sostenible de una especie pionera de madera para los medios de vida locales. *CIFOR Brief*, 24, 2 https://www.cifor.org/publications/pdf_files/infobrief/4424-infobrief.pdf
- Escoto García, T., Beas, N., Contreras, H., Rodríguez, A., Díaz-Ramos, S. G., Anzaldo, J., & Vega R. (2017). Caracterización dasométrica y químico-micrográfica de tres especies de pino y su viabilidad de aprovechamiento integral. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(41), 1-30. doi: 10.29298/rmcf.v8i41.28
- Fernández-Puratich, H., & Oliver-Villanueva, J. V. (2014). Cuantificación de biomasa y valor energético de renovales de *Quercus ilex* en condiciones mediterráneas. *Bosque*, 35(1), 65-74. doi:10.4067/S0717-92002014000100007
- Fogila, R. C. (2005). Conceptos básicos sobre el secado de la madera. *Kurú. Revista Forestal*, 2(5), 1-5. <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/546/472>
- Fonseca, G. W., Alice, F., & Rey, J. (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque*, 30(1), 36-47. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/bosque/v30n1/art06.pdf>
- Instituto del Bien Común. (2014). Densidad de carbono, áreas protegidas y territorio indígenas, *Instituto del Bien Común*. <https://ibcperu.org/en/publicacion/mapa-amazonia-densidad-de-carbono-areas-protegidas-y-territorios-indigenas-2/>
- Gaibor-Chávez, J., Pérez-Pacheco, S., Velázquez-Martí, B., Niño-Ruiz, Z., & Domínguez-Narváez, V. (2016). Dendrometric Characterization of Corn Cane Residues and Drying Models in Natural Conditions in Bolivar Province (Ecuador). *Renewable Energy*, 86, 745-750. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.09.009>
- Garay, M., & Henríquez [sic], M. R. (2012). Tratamiento químico de acetilación en madera de *Pinus radiata*. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 14(1), 103-113. doi: 10.4067/S0718-221X2012000100009
- García-Martín, A., Pérez-Cabello, F., & De la Riva, J. (2006). Evaluación de los recursos de biomasa residual forestal mediante imágenes de satélite Landsat y SIG. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 6, 205-230.
- Gómez de la Cruz, F. (2015). Estudio y análisis de la cinética de secado de subproductos de almazara para su aplicación a secaderos rotativos [Tesis doctoral, Universidad de Jaén Escuela Politécnica Superior de Jaén]. Repositorio Institucional de Producción Científica. <http://ruja.ujaen.es/bitstream/10953/675/1/9788484399391.pdf>
- González, J., Papue, A., González, V., Borja A., & Oliva, D. (2018). Crecimiento y conservación de *Piptocoma discolor* (Pigüe) en la provincia de Pastaza. *Cfores. Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 6(3), 366-379. <http://scielo.sld.cu/pdf/cfp/v6n3/2310-3469-cfp-6-03-366.pdf>
- Gutiérrez Pulido, H., & Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos* (2.ª ed.). McGraw-Hill.
- Henderson, S. M. (1974). Progress in Developing the Thin Layer Drying Equation. *Transactions of the ASAE*, 17(6), 1167-1172. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.37052>
- Hurtado, E., & Guayara, A. (2013). Potencial de uso de *Piptocoma discolor* (Kunth) pruski en sistemas silvopastoriles. *Ingenierías & Amazonía*, 6(1), 8. <https://bit.ly/2JBhm7e>

- Ley Forestal y de Conservación de Áreas Naturales y Vida Silvestre. (2004). Capítulo VI: De producción y aprovechamiento forestal. 10 de septiembre. Registro Oficial 418. <https://bit.ly/33KLJPE>
- MAE (2015). *Proceso metodológico para el desarrollo de modelos alométricos para especies, grupo de especies y estratos en el Ecuador*. Informe Guía.
- MAE (2009). *Estudio para determinar la abundancia de Piptocoma discolor y otras especies potenciales para la industria de pallets y cajonería en la provincia de Pastaza*.
- Martínez, S. (2009). *Evaluación de la biomasa como recurso energético renovable en Cataluña* [Tesis doctoral, Universitat de Girona]. <https://bit.ly/33Ng3J8>
- Merino, J. (2010). *Estudio económico de dos formas de aprovechamiento forestal del pigüe (Pollaslesta discolor) en el cantón Mera, provincia de Pastaza* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. DSpace ESPOCH. <https://bit.ly/3qrSijD>
- Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2002). New Model for Single-layer Drying. *Dry Technology*, 20(7), 1503-1513. <https://doi.org/10.1081/DRT-120005864>
- Ministerio de Ambiente, Proyecto Manejo Forestal Sostenible ante el Cambio Climático, & Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2014). *Evaluación Nacional Forestal de Resultados*. <https://bit.ly/2leERn>
- Montero Puertas, I. (2005). *Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos* [Tesis doctoral, Universidad de Extremadura]. Servicio de Publicaciones. <https://biblioteca.unex.es/tesis/8477237115.pdf>
- Moretti, A. P., Olguin, F., Pinazo, M., Gortari, F., Vera, J., & Corina, G. (2019). Supervivencia y crecimiento de un árbol nativo maderable bajo diferentes coberturas de dosel en el Bosque Atlántico, Misiones, Argentina. *Ecología Austral*, 29, 099-111. <https://bit.ly/39QJLRg>
- Murillo, G. O., & Camacho, M. P. (1998, nov. 22-28). *Metodología para la evaluación de la calidad de plantaciones forestales*. Primer Congreso Latinoamericano IUFRO, Valdivia, Chile. <https://bit.ly/37D6Nso>
- Murillo, O., & Camacho, P. (1997). Metodología para la evaluación de la calidad de plantaciones forestales recién establecidas. *Agronomía Costarricense*, 21(2), 189-206. https://www.mag.go.cr/rev_agr/v21n02_189.pdf
- Pérez-Peña, N., Valenzuela, L., Díaz-vaz, J., & Ananías, R. (2011). Prediction of Equilibrium Moisture Content in Wood in Relation to the Specific Gravity of the Cell Wall and Environmental Variables. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 13(3), 253-266. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2011000300002>
- Riofrío, J., Ramos, R., & Muñoz, J. (2006). Ajuste de modelos alométricos para biomasa de *Acacia melanoxylum* L bajo sistema agroforestal en la Sierra ecuatoriana. *X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo*. <https://bit.ly/33MSCjn>
- Romahn, C., & Ramírez, H. (2010). *Dendrometría*. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Chapingo. <http://dicifo.chapingo.mx/pdf/publicaciones/dendrometria.pdf>
- Salinas, B., Carpio, C., Salazar E., Noboa, V., Espinoza, M., & Román, D. (2019). Caracterización anatómica de la madera de cinco especies comerciales del sector la colonia Simón Bolívar, cantón Santa Clara, provincia de Pastaza. *European Scientific Journal*, 15(18), 255 <https://pdfs.semanticscholar.org/cd54/f84b6750a37f260c366b276fdc6163ddec56.pdf>
- Salinas, C., Ananías, R., & Alvear, M. (2004). Simulación del secado convencional de la madera. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 6(1), 3-18, <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2004000100001>
- Sebastián, F., García, D., & Rezeau, A. (Coords.). (2010). *Energía de la biomasa* (Vol. 1). Publicaciones de la Universidad de Zaragoza. <https://bit.ly/3gg3USi>
- Siau, J. F. (1984). *Transport Processes in Wood*. Springer. <https://bit.ly/3lCloo8>
- Sistema Nacional de Áreas de Conservación & Programa REDD/CCAD-GIZ. (2014). *Manual de campo inventario forestal nacional de Costa Rica: Diseño de parcela y medición de variables de sitio y dasométricas* (Vol. 2, pp. 25-40). Programa REDD/CCAD-GIZ. <https://bit.ly/3mK4Yae>

- Sunil, J., & Ajaygiri, K. (2015). Application, Advancements and Research on Drying- A Review. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 3(VIII), 403-406. <https://www.ijraset.com/files/serve.php?FID=3227>
- Treybal, R. E. (1988). Secado. En *Operaciones de transferencia de masa* (2.ª ed., pp. 723-791). McGraw-Hill. <https://bit.ly/36G0uVy>
- Umaña-Calderón, M., Muñoz-Mena, J., Pacheco-Retana, Y., & Vargas-Elías, G. (2019). Cinética del secado de coco por radiación. *Revista Tecnología en Marcha*, 32(Especial XIII CLIA). doi: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i7.4269>
- Unión General de Trabajadores. (2016). Introducción general. En *Estudio sobre el aprovechamiento energético de la biomasa, energías renovables y reducción de emisiones de CO2 en los municipios de Castilla y León* (pp. 3-18). <https://bit.ly/3lP9r3q>
- Velázquez-Martí, B., Fernández-González, E, Estornell, J., & Ruiz, L. A. (2010). Dendrometric and Dasometric Analysis of the Bushy Biomass In Mediterranean Forests. *Forest Ecology and Management*, 259(5), 875-882. doi:10.1016 / j.foreco.2009.11.027
- Velázquez-Martí, B., Gaibor-Chávez, J., & Pérez-Pacheco, S. (2016). Quantification Based on Dimensionless Dendrometry and Drying of Residual Biomass from the Pruning of Orange Trees In Bolivar Province (Ecuador). *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 10(2), 175-185. <https://doi.org/10.1002/bbb.1635>
- Velázquez-Martí, B., Estornell, J., López-Cortés, I., & Martí-Gavilá, J. (2012). Calculation of Biomass Volumen of Citrus Trees from An Adapted Dendrometry. *Biosystems Engineering*, 112(4), 285-292. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.04.011>
- Villalba, V. (2019). Determinación de la viabilidad técnica y económica de la combustión del pigüe (*Piptocoma discolor*) para su uso como combustible en la provincia de Pastaza [Tesis de grado, Universidad Estatal Amazónica]. Repositorio institucional. <https://bit.ly/2L8BKNw>
- Wan Noor, A., Hashim, R., Danish, M., Sulaiman, O., & Hiziroglu, S. (2014). Model of Drying Kinetics of Acacia Mangium Wood at Different Temperatures. *Drying Technology An Internactional Journal*, 32(3), 361-370. doi: 10.1080/07373937.2013.829855