

# *Tecnología más limpia a través de la integración de procesos en la producción de papel para ondular*

Meilyn Gonzalez Cortés<sup>1</sup>, Erenio González Suárez<sup>1</sup>, Gabriela Corsano<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro de Análisis de Procesos, Facultad de Química Farmacia, Universidad Central de Las Villas. Carretera a Camajuani, km 5 1/2, Santa Clara, Villa Clara. Cuba. 54830.

Teléfono: (+53) 42 281164 - Fax: (+53) 42 272333

Email: [mgonzalez@uclv.edu.cu](mailto:mgonzalez@uclv.edu.cu); [erenio@uclv.edu.cu](mailto:erenio@uclv.edu.cu)

<sup>2</sup> Instituto de Desarrollo y Diseño, INGAR, Argentina.

Email: [gcorsano@ceride.gov.ar](mailto:gcorsano@ceride.gov.ar)

## RESUMEN

Se desarrolla una metodología de análisis e integración de procesos que previene la generación de los residuales en la planta, logrando una tecnología más limpia, la cual se aplica en la solución de la problemática tecnológica y ambiental de la industria de pulpa y papel para ondular.

Su aplicación en una fábrica de papel para ondular, permitió proponer cambios tecnológicos para el empleo de 45% de etanol en base a fibra seca de bagazo, como un solvente menos agresivo al medio, se reduce el consumo de hidróxido de sodio hasta 1%, lo cual disminuye el efecto agresivo del licor negro, se mantiene la temperatura en 175 °C y el tiempo de cocción en 15 minutos, de forma similar a como se realiza a escala industrial.

Se logra una reducción del 80% en el consumo de agua fresca y vertido de residuos acuosos al entorno.

El impacto de la tecnología se evalúa a través de un análisis de las mejoras logradas en los aspectos: tecnológico, económico y ambiental.

**Palabras Claves:** tecnologías limpias, integración de procesos, reciclado de agua, producción de papel

## ABSTRACT

A methodology for the analysis and integration of process that allow the generation of wastes in the plant is developing, obtaining a more clean technology, which is applied in the solution of the technological y environmental problem of the industry of pulp and paper board.

Its application in a factory of paper board, allow propose technological changes for the use of 45% of ethanol in base on dry fiber of sugar cane baggasse, as a solvent less aggressive to the environment, the consume of sodium hydroxide was reduced 1%, which diminish the aggressive

effect of black liquor, the temperature was maintained in 175 °C and the de treatment time in 15 minutes, the same as do at industrial level.

A reduction of 80% in the fresh water consume is obtained and the aqueous wastes reduction the environment.

The impact of the technology is evaluated by a global model that quantified the obtained results in the technological, economical and environmental aspects.

**Key words:** Clean technologies, integration of process, water recycling, paper production

## **1. INTRODUCCIÓN**

Encontrar una solución que minimice la agresividad de los residuales que se generan en el proceso de producción de papel, ha sido siempre una prioridad de los especialistas de la industria de papel para ondular, sobre todo en aquellas donde no se justifica, por los bajos precios del producto, ni técnica ni económicamente el tratamiento del licor negro a través de la recuperación de los productos químicos presentes en el mismo.

En la literatura aparecen investigaciones, (6), en las que se propone el empleo de solventes orgánicos, como el etanol, en el proceso de cocción, para la obtención de tecnologías más limpias. En estos además de favorecerse la selectividad hacia la separación de la lignina, objetivo principal de esta etapa, propicia la generación de un residual menos contaminante, del cual se puede recuperar parte del solvente empleado inicialmente, y otros productos como la lignina que a la vez constituyen materias primas para otros procesos, (7), (11), (19).

Por otro lado, se ha referido también como debilidad de este proceso el desaprovechamiento de las posibilidades del reciclado del agua al proceso y partiendo de que en éste se consume una cantidad considerable de agua fresca y se genera un gran volumen de residuos acuosos, no se explota de forma eficiente este recurso, (2), (22).

A través de la aplicación de una estrategia que considere la Integración de Procesos se pueden proponer soluciones alternativas para las deficiencias señaladas anteriormente. (4), (5), (10), (18), (20).

## **2. MATERIALES Y METODOS**

La estrategia desarrollada para la obtención de la tecnología más limpia en la fabricación de papel para ondular consistió en los siguientes pasos:

1. Diseños experimentales tipo factorial  $2^3$  y  $3^2$ , cuyas variables en dependencia del diseño planteado fueron: tiempo de cocción, por ciento de etanol, por ciento de hidróxido de sodio, relación licor de cocción/ fibra de bagazo. Como variables dependientes se evaluó el rendimiento en la cocción, el por ciento de lignina residual en el bagazo, el grado de cocción evaluado en el número de kappa y propiedades indicadoras de la resistencia del papel. Las evaluaciones de las propiedades anteriores se hicieron siguiendo las normas TAPPI: T-811, T-808, T-818, (22).

El objetivo del estudio experimental estuvo en el análisis de la posibilidad de cambiar la ruta de reacción y emplear el etanol en el pulpeo de bagazo, (9), (15), (16).

2. Debido a que el empleo de un nuevo método de pulpeo traerá como resultado la obtención de una pulpa de propiedades físico-químicas y morfológicas diferentes y por lo tanto un comportamiento particular en el proceso tecnológico, se estudia la influencia del empleo de la nueva pulpa, (pulpa hidroalcohólica con mínimo por ciento de hidróxido de sodio), en la formulación que se utilizará para la fabricación de papel para ondular, (3), (8), (14).

En el caso particular que nos ocupa, la pasta se evaluó midiendo la CMT (resistencia a la compresión de la onda), a hojas formadas con diferentes composiciones de: Pulpa semiquímica de bagazo cocida con hidróxido de sodio (proceso tradicional); Pulpa semiquímica de bagazo cocida con etanol e hidróxido de sodio en porcentajes de 1; Pulpa de papel reciclado. Para la evaluación de la resistencia CMT se siguió la norma TAPPI, T - 818, referida anteriormente y las hojas se conformaron en un formador de laboratorio del tipo Rapid Köthen según el método ISO 5259/2., (23).

3. Estrategia de integración de masa. Reciclado de agua en el proceso de producción de papel para ondular (13), (17), (21).

Se detectaron posibilidades de reducción del consumo de agua y el vertido de residuos acuosos, a través de la implementación del cierre de los circuitos de este material. La estrategia consistió en la identificación de las posibilidades de mezclado, reciclado directo y las necesidades de intersección de flujos.

En el caso de estudio, el contenido de fibras en las corrientes residuales, constituye el elemento que provoca un efecto más negativo al medio, además, se está analizando la posibilidad de recuperar un material de valor para el proceso.

Se parte, de identificar el consumo de agua en las diferentes operaciones, así como los flujos de efluentes que pueden ser reciclados potencialmente, de estos últimos se muestran sus características fundamentales en la tabla 1. Se valoran en el análisis 23 sumideros y 3 flujos fuentes. Los sumideros, son aquellos equipos que consumen agua fresca y las fuentes son los flujos de residuales que son generados y que pueden ser reciclados al proceso, (1), (12).

**Tabla 1. Flujo y composición de las fuentes seleccionadas para el análisis de las posibilidades de reciclado de agua al proceso**

**Planta de pulpa**

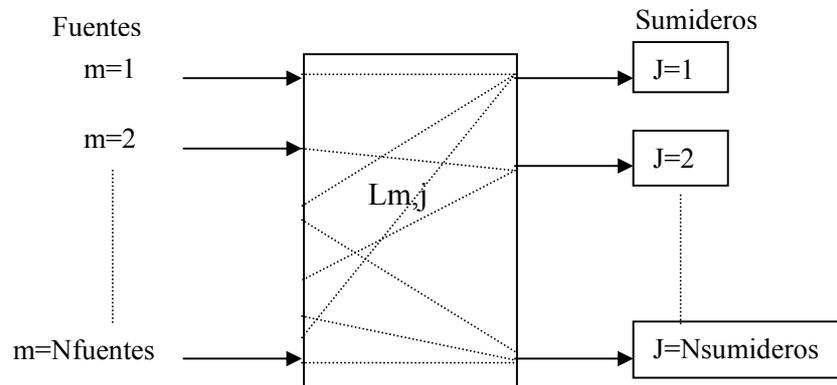
Fuentes	Flujo de agua (m <sup>3</sup> /d)	Composición (% de fibras)
Desaguador de médula (A)	1888	0,1
Prensa Lamort (B)	193,13	0,1
<b>Total</b>	<b>2081,13</b>	

**Máquina de papel**

Fuentes	Flujo de agua (m <sup>3</sup> /d)	Composición (% de fibras)
Safe All (C)	499,00	0,1

El proceso actual demanda 2519 m<sup>3</sup>/d de agua fresca y genera 2580 m<sup>3</sup>/d de residuales acuosos con posibilidades de ser reciclados.

El máximo reciclado sin violar los niveles de restricción, así como la cantidad de fibra a separar de las corrientes se logró planteando una formulación matemática del problema y realizando luego su optimización. El análisis realizado para la formulación matemática del problema se plantea a continuación: el proceso tiene  $N_{\text{sumideros}}$  y  $N_{\text{fuentes}}$ . Los  $N_{\text{sumideros}}$  se corresponden con el número de unidades que requieren agua fresca como entrada y en las fuentes (corrientes que llevan la especie de interés) se considerará sólo una fuente de agua fresca. Por lo tanto serán  $(N_{\text{fuente}}-1)$  flujos de efluentes acuosos que pueden ser potencialmente reciclados, figura 1.



**Figura 1.** Representación de la distribución de flujos desde las fuentes a los sumideros para el desarrollo de la estrategia matemática

Función objetivo:

$$\min = L_{Nfuente} \quad \text{donde: } L_{Nfuente} = \sum_{j=1}^{Nsumidero} L_{Nfuente, j} \quad j = 1, 2, \dots, N_{sumidero} \quad (1)$$

Sujeta a las restricciones de segregación, reciclaje e intersección, dadas por:

- Balance de materiales en la fuente
- Balance de materiales en un sumidero
- Balance de composición de entrada a un sumidero
- Balance para la intersección de una fuente (m) en específico

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado del estudio experimental se desarrollaron modelos matemáticos característicos de variables indicadoras de la calidad del pulpeo y la calidad del papel fabricado con dicha pulpa. Como se explicó en la sección de materiales y métodos se realizaron 5 diseños experimentales, en cada paso experimental se ajustaron los niveles de las variables independientes de forma tal de lograr un acercamiento al óptimo experimental de modo que en el diseño final realizado se ensayaron los siguientes niveles en las variables independientes:

$x_1$ : tiempo de cocción: 10 -15 min;  $x_2$ : % Hidróxido de sodio: 1 – 1,5%;  $x_3$ : % etanol: 30-45%.

Se obtuvieron los siguientes modelos:

**Tabla 2. Modelos obtenidos para cada variable dependiente**

<b>Variable dependiente</b>	<b>Modelo</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Kappa	$105,76 + 0,48*x_1 - 2,99*x_2 - 0,27x_3 + 0,68*x_1x_2 - 11,79*x_1x_3 + 0,43*x_2x_3$	95,63
Rendimiento	$73,44 + 1,26*x_1 - 1,77*x_2 + 2,69*x_3 + 1,50*x_1x_2 - 0,91*x_1x_3 + 2,53*x_2x_3$	96,77
CMT	$183,53 + 4,65*x_1 - 0,86*x_2 + 0,86*x_3 + 0,71*x_1^2 - 0,77*x_1x_3 + 0,17*x_2x_3$	96,45

La adecuación de los modelos anteriores fue comprobada; en los mismos los valores de R<sup>2</sup> ajustado son elevados lo que indica la validez de los mismos, se comprobó estadísticamente que las variables que se incluyen son significativas. Puede verse como para todas las variables dependientes el por ciento de etanol e hidróxido de sodio empleado ejercen una influencia similar, siendo favorable la respuesta en el nivel superior de la variable que caracteriza la concentración de etanol y desfavorable en la variable que caracteriza al hidróxido de sodio. Este resultado, el cual se ha obtenido para los niveles expresados anteriormente, corrobora lo que expresa la teoría de que el empleo de etanol en el proceso de cocción favorece y es selectivo a la separación de la lignina, lo cual permite el empleo de menores concentraciones de hidróxido de sodio en el licor de cocción y por tanto mayores niveles de calidad en la pulpa producida bajo estas condiciones y por tanto mayores valores de CMT, rendimiento y número de kappa, atendiendo a que la norma para estas variables en este tipo de pulpa que será empleada en su formulación con pulpa de recorte para la fabricación de papel para ondular es la siguiente: CMT ≥ 160 N; rendimiento 70-80 % y número de kappa<sup>1</sup> 95-105.

Para obtener las condiciones óptimas en el pulpeo se planteó una estrategia de optimización jerárquica en la que la función objetivo fue la maximización del valor de la resistencia del papel CMT, hasta el valor normado, sujeto a restricciones como: los niveles de experimentación ensayados para cada variable independiente, así como los valores de las variables rendimiento y número de kappa obtenidos por la evaluación de los modelos en las condiciones límites ensayadas. De la optimización se obtuvo que las condiciones a emplear en el pulpeo semiquímico de bagazo con etanol e hidróxido de sodio para lograr variables respuestas de calidad son las siguientes:

- por ciento de etanol, base fibra seca: 45%

<sup>1</sup> El número de kappa número referativo del grado de cocción de la fibra de madera, es un indicador de la lignina residual presente en la fibra maderera, por esto no tiene unidades.

- por ciento de hidróxido de sodio, base fibra seca: 1 %
- Hidromódulo 5:1
- Temperatura de cocción: 175 °C
- Tiempo de cocción: 15min

De esta forma se demostró, que es posible el empleo de etanol en el pulpeo semiquímico de bagazo, aspecto que no se había abordado en la literatura, donde sólo se ha reportado este método para pulpas químicas para la fabricación de papeles blancos.

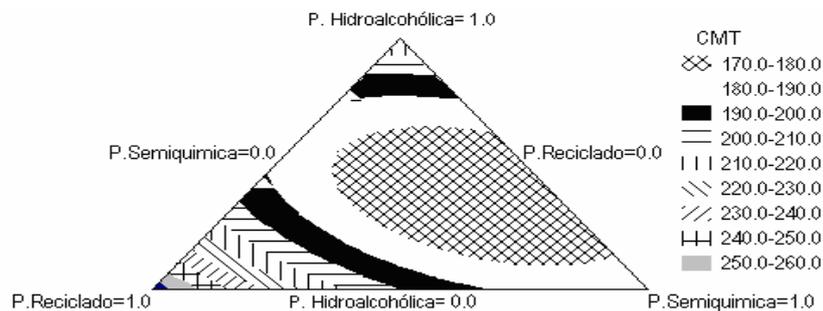
Por otro lado, los resultados obtenidos para los tres tipos de pulpa y las diferentes composiciones de las mezclas con hojas formadas en el laboratorio se muestran a continuación. El modelo de mezcla de los tres componentes, que representa la propiedad CMT fue el siguiente:

$$\text{CMT [N]} = 220 *x_1 + 266 *x_2 + 190 *x_3 - 220 * x_1x_2 - 124 *x_1x_3 - 112*x_2*x_3$$

**Tabla 3. Formulación de mezcla para 1% de hidróxido de sodio, 45% de etanol**

Nro	Formulación	%	Valor de CMT
1	Hidroalcohólica 1%	100	220
2	Reciclado	100	266
3	Semiquímica	100	190
4	Hidroalcohólica 1%-Semiquímica	50-50	174
5	Hidroalcohólica 1%-Reciclado	50-50	188
6	Reciclado - Semiquímica	50-50	200
7	Hidroalcohólica 1%-Reciclado	35-65	205
8	Hidroalcohólica 1%-Reciclado-Semiquímica	25-25-50	183
9	“	25-50-25	189
10	“	50-25-25	181
11	“	33-33-33	179

A continuación se muestra el diagrama triangular para el estudio de mezcla realizado, en el mismo pueden observarse los intervalos de la propiedad CMT para diferentes puntos de mezcla.



**Figura 2.** Diagrama triangular de contorno: 1% de sosa, 45% de etanol en la cocción.  
Respuesta: CMT

Se obtuvo que las formulaciones óptimas desde el punto de vista técnico estaban constituidas por:

- 86 % de pulpa hidroalcohólica 1% NaOH y 14% de pulpa de reciclado
- 35% de pulpa hidroalcohólica 1% de NaOH y 65% de pulpa de reciclado

Para obtener la formulación óptima, se recurrió a representar las mezclas en un diagrama triangular, evaluando como variable respuesta el costo de producción de la formulación, se seleccionó como óptima aquella que además de reunir las características técnicas fuera la más económica.

La formulación de pasta óptima de pulpa hidroalcohólica 1% de NaOH y pulpa de reciclado, es la que contiene 35 % de la primera y 65% de la segunda, con un costo de producción de 2113612 \$/año.

### **Resultados de la estrategia de reciclado de agua**

Para la solución de la estrategia matemática se utilizó el programa LINGO<sup>TM</sup>, en el que fueron planteadas las ecuaciones descritas anteriormente. En este caso, el consumo de agua necesario arrojó un resultado de 372 m<sup>3</sup>/d y quedan para el vertido 393 m<sup>3</sup>/d, es decir tanto el consumo de agua fresca como el vertido de residuales acuosos se redujo en más de un 80%, además fue posible la recuperación de 69 m<sup>3</sup>/d de fibra.

La cantidad de flujo fuente, reciclada a los sumideros es representada a continuación:

#### **Del desaguador de médula a:**

Desaguador de médula: 238 m<sup>3</sup>/d

Espesador: 216 m<sup>3</sup>/d

Desaguador de bagazo: 198 m<sup>3</sup>/d

Pata barométrica: 86,4 m<sup>3</sup>/d

Hidrociclón : 40 m<sup>3</sup>/d

Refinador Beloit: 18 m<sup>3</sup>/d

Safe All: 312 m<sup>3</sup>/d

Hidropulper: 29 m<sup>3</sup>/d

Couch: 94 m<sup>3</sup>/d

Clasificador Beloit: 29 m<sup>3</sup>/d

Refinador Sueco: 18 m<sup>3</sup>/d

Mesa Formadora: 605 m<sup>3</sup>/d

**Del Safe All a:**

Refinador Master: 29 m<sup>3</sup>/d

Hidrociclón: 86,4 m<sup>3</sup>/d

Hidropulper 8: 29 m<sup>3</sup>/d

Depurador de pasta espesa, DPE: 86,4 m<sup>3</sup>/d

Refinador de pasta de recortes: 87 m<sup>3</sup>/d

Sólo en seis equipos se utilizará agua fresca. Los mismos, consumen pocas cantidades de agua y como requerimiento del proceso, ésta debe tener una mayor calidad, por lo que resulta de mayor beneficio para el proceso utilizar agua fresca.

Es importante hacer notar que para alargar los buenos resultados de esta estrategia es necesario “abrir el circuito” e incorporar agua fresca al proceso cada 15 días.

#### **4. CONCLUSIONES**

Las conclusiones del trabajo se resumen en los impactos logrados en las diferentes esferas y que se señalan a continuación:

##### **Impacto Económico**

- Se aumenta la eficiencia económica del proceso por el empleo de pulpas menos costosas, lo que significa una disminución de los costos de producción en un 8,4 %, lo que representa un ahorro de 676808 \$/a.
- Se aumentan los rendimientos productivos en el área de pulpeo en un 4%, lo que representa un ahorro de 3780 \$/a.

##### **Impacto Tecnológico**

- Aumenta la calidad de la producción

- Se puede aprovechar gran parte del equipamiento del proceso existente, sólo son necesarios equipos auxiliares, redistribución de tuberías y equipos de bombeo
- Se logra una producción más limpia

### **Impacto Ambiental**

- Se logra disminuir la carga de contaminantes
- Se disminuye el consumo de agua en un 85%, lo que representa un ahorro de 66486 \$/a.
- Se disminuye el vertido de residuales acuosos a tratar al final de la tubería en un 80%, lo que representa un ahorro de 13294 \$/a.
- Disminución de las áreas afectadas por el vertido de residuos contaminantes, lo cual se puede valorar por los resultados siguientes:
  1. Eliminación de la expulsión de gases contaminantes a la atmósfera en el área de pulpeo
  2. Eliminación del vertido de residuales a altas temperaturas al medio en las plantas de pulpa y máquina de papel

### **5. REFERENCIAS**

1. Berbard, S; Sorin, M. 2000, "Water minimization in the washing area". Tappi Journal. Vol. 83, No 9, pp. 1-12. September.
2. Collins, J.W., Dallons, V. J., 1988, "Aspects of water reuse in the pulp and paper industry" Aiche Symposius Series Water, No. 190, Vol. 75.
3. Cripps, H., "Process integration in the pulp and paper industry". Tappi Journal. Vol. 81, No 10. February, 2000.
4. Dunn, R; Bush, G. E. "Using process integration technology for cleaner production". Journal of cleaner production. Vol. 8, pp 1-23, 2000
5. El-Halwagi, M. M; Spriggs, H. D. "Solve design puzzles with mass integration". Chemical Engineering Progress. pp. 25-42 August, 1998.
6. El-Sakhawy, M, Fahmy Y, Ibrahim AA & Lonnberg B (1995) (a) Organosolv pulping, (1) alcohol pulping of bagasse. Cellul Chem Technol 29: 615-629.
7. Funkquist J., 1994, A Dynamic Model of the Continuous Digester. A Simulation Study. Department of Signals, Sensors & Systems (S3) Automatic Control. Royal Institute of Technology. Stockholm 1994

8. Garrison, G. W; El-Halwagi, M. M. "A Global Approach to Integrating Environmental, Energy, Economic, and Technological Objectives" American Chemical Society. Spring Meeting Session, 2000.
9. González, C. M., González S., E. (a), El pulpeo con etanol para elevar la competitividad de fábricas de papel y su desarrollo prospectivo integrado a fábricas de derivados de la caña de azúcar. III Taller Caribeño Energía y Medio Ambiente, abril 2004
10. González, C., M., Acevedo L., González S., E., (b), La Integración de Procesos en la minimización del impacto ambiental. Congreso de Química. México. Septiembre 2002.
11. Hamad, A; Varma, V. "Mass integration analysis: a technique for reducing methanol and effluent discharge in pulp mills". Tappi journal. Vol. 81, No 10. October, 1998
12. Histed, J. A; Nelson, G. G, 1990, "Water reuse and recycle in pulp and paper industry". Pulp and Paper Canada. Vol. 80, No. 3, pp 74-80.
13. Jaber, D., 2001, Cut costs whit condensate return. Tappi Journal, Vol 84 N 2 p-24 February
14. Jiménez L., Angulo V., García E., Rodríguez A.: Obtención de pastas celulósicas a partir de sarmientos vid. Afinidad, 61 (511), pp. 194. 2004.
15. Jiménez, L., Maestre F., Pérez I.: Disolventes orgánicos para la obtención de pastas de celulosa. Revisión bibliográfica. Afinidad, 44 (467), pp. 45. 1997.
16. Jiménez, L., Obtención de pastas de celulosa utilizando mezclas de etanol-agua. Afinidad, 55 (474), (1998).
17. Johnson, T. 2001, "The water map-a guide to managing yours mill's systems". Tappi journal. Vol. 44, No 1. pp. 37-38.
18. Labidi, J., Mutjé, P., 2001, "Integración de procesos en fabricas de papel". Revista El Papel Junio/Julio.
19. Muurinen, E., 2000, Organosolv pulping. A review and distillation study related to peroxyacid. Department of Process Engineering, OULU 2000. Academic Dissertation to be presented with the assent of the Faculty of Technology, University of Oulu, for public discussion in Savonsali (Auditorium L 4), Linnanmaa, on June 30th, 2000, at 12 noon. ISBN 951-42-5660-3, ISSN 0355-3213, <http://herkules oulu.fi/issn03553213/>
20. Ortiz F., Pérez I., Eugenio M., Jiménez L., Tratamientos de los efluentes de la fabricación de pastas celulósicas para papel. Breve revisión bibliográfica. Afinidad, 60 (505), pp. 239. (2003).

21. Tripathi, P., 1996, "Pinch technology reduces waste water". Chemical engineering. Vol. 103, No 11, pp. 87-90. November.
22. [www.ipst.edu/epri/new\\_pubs.htm](http://www.ipst.edu/epri/new_pubs.htm): Minimizing Mill Water Use with Water Pinch Technology Energy and Water Successive Design Methodologies. 2002. Bajado 26/01/03
23. Zescoto, G., T., 2002. Evaluación de la calidad en pulpa, papel y cartón. El concepto de calidad total. Departamento de Madera Celulosa y Papel. Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías.