

PROCESO ESTOCÁSTICO CADENAS FINITAS DE MARKOV (FMC), MOVIMIENTO DE CARGA Y VALOR PORTUARIO EXPORTABLE DE BOLIVIA Y SU ACCESO A LOS OCÉANOS PACÍFICO Y ATLÁNTICO

STOCHASTIC PROCESS FINITE CHAINS MARKOV (FCM), MOVEMENT OF PORT CARGO AND VALUE EXPORTABLE FROM BOLIVIA AND ITS ACCESS TO THE PACIFIC AND ATLANTIC OCEANS

Erick C. Grudner Carranza*

RESUMEN	ABSTRACT	RESUMO
<p>En este artículo, se propone una estrategia en función del tiempo y sus consecuencias para disminuir la dependencia que tiene el país por puertos chilenos. A través de un proceso estocástico de Cadenas Finitas de Markov (FMC), aplicado al movimiento de carga y valor portuario exportable de Bolivia y su acceso al Océano Pacífico (puerto de Matarani territorio peruano) y hacia el Océano Atlántico (utilizando el Canal Tamengo y la HPP). Estableciendo una proyección factible a mediano plazo de investigación operativa que permita reducir significativamente en 18 años y en adelante esta dependencia. Siempre y cuando la estrategia sea complementada con políticas de comercio exterior.</p> <p>PALABRAS CLAVE: Procesos estocásticos, cadenas de Markov, producto iterativo fila-columna, diagramas de dispersión, comercio exterior, Sistema portuario canal de Tamengo.</p>	<p>In this article, a strategy based on time and its consequences is proposed to reduce the country's dependence on Chilean ports. Through a stochastic process of Finite Markov Chains (FMC), applied to the cargo movement and port exportable value of Bolivia and its access to the Pacific Ocean (Matarani port of Peruvian territory) and to the Atlantic Ocean (using the Tamengo Canal and HPP). Establishing a feasible medium-term projection of operational research and applied mathematic that allows to reduce this dependence significantly in 18 years and beyond. As long as the strategy is complemented with foreign trade policies.</p> <p>KEYWORDS: Stochastic processes, Markov chains, iterative row-column product, dispersion diagrams, foreign trade, Tamengo Canal Port System.</p>	<p>Neste artigo, propõe-se uma estratégia baseada no tempo e suas consequências para reduzir a dependência do país dos portos chilenos. Através de um processo estocástico de Cadeias de Markov Finitas (FMC), aplicado ao movimento de cargas e valor exportável portuário da Bolívia e seu acesso ao Oceano Pacífico (porto Matarani do território peruano) e ao Oceano Atlântico (usando o Canal Tamengo e HPP). Estabelecendo. Uma projeção de médio prazo de pesquisa operacional e matemática aplicada que permita reduzir significativamente essa dependência em 18 anos e além. Enquanto a estratégia for complementada com políticas de comércio exterior.</p> <p>PALAVRAS-CHAVE: Processos estocásticos, Cadeias de Markov, produtos de linha-coluna iterativo, diagramas de dispersão, comércio exterior canal da porta do sistema Tamengo.</p>
<p>History of the article: Received: 25/05/2018. Style review: 27/05/2018. Accepted: 05/06/2018.</p>		

INTRODUCCIÓN

Tabla 1

Vías de transporte ex fronterizo y producto exportable principal que atravesó por nuestras fronteras en 2017

LUGAR DE SALIDA	PRINCIPAL PRODUCTO
Uyuni - Ollague - Antofagasta	Minerales de cinc
Tambo Quemado - Charaña - Arica	Estaño en bruto lingotes
Charaña - Arica	Aceites crudos de petróleo o mineral bituminoso
Bella Vista - Pisiga - Iquique	Mineral de cinc y conc.
Apacheta - Antofagasta	Ácido orto bórico
Desaguadero	Soya y derivados
Puerto Suárez - Corumbá	Gas natural
Puerto Quijarro - Arroyo Concepción	Boratos y sus conc.
San Ignacio - San Vicente - San Matías	Gas natural
Guayaramerín - Cobija - Amazonas	Nueces del Brasil
Bermejo - Orán	Alcohol etílico 96%
Villazón - La Quiaca	Óxidos de antimonio
Yacuiba - Pocopos	Gas natural
Boyuibe - Fortín Villazón	Gas licuado de petróleo
Zonas Francas	Copolímeros de propileno
AÉREA	Formas de oro en bruto

Fuente: Elaboración propia sobre información de [1]

La matriz boliviana de exportación, está formada por dos grandes grupos genéricos¹: Productos Tradicionales² (T) y No Tradicionales³ (NoT). Es así, que para comercializar

¹ Segmentación que porcentualmente para el período 2014 a 2017 muestra la relación 91 T a 9 NoT, es decir que por cada (10 t) que se exportan, nueve corresponden a T y una a NoT. Complementariamente en millones de dólares la relación porcentual es 81T a 19 NoT, es decir, que por cada diez millones de dólares americanos en valor de las exportaciones, aproximadamente ocho corresponden a T y dos a los NoT. [1]

² (T) Gas natural, petróleo, derivados y minerales (IBCE, 2018). [1]

³(NoT) Agroindustriales, agrícolas, ganaderos, de caza, pesca, cultivo de bosques e industriales de manufactura básica. En el período 2014 a 2017 concentraron el 90 por ciento en valor los siguientes productos: soya y derivados, quinua, nueces del Brasil, girasol y derivados, artículos de joyería (oro, plata), maderas y sus manufacturas, cueros y sus manufacturas, lácteos, azúcar, alcohol y derivados, confecciones textiles, bananas, frijol, palmitos y café. (IBCE, 2018). [1]

productos de un grupo determinado grupo o de ambos, el comercio exterior boliviano ha ido implementando vías de transporte intrafronterizos y ex fronterizos, de acuerdo con las características de los productos y el mercado final de éstos, desarrollando además canales de distribución (especialmente transporte y almacenaje) para la carga de productos a ser enviados por vía marítima.

Con relación a las vías del transporte ex fronterizo que apoyan el comercio exterior boliviano, la tabla 1 muestra los lugares de salida y el producto principal exportable que atravesó por nuestras fronteras en 2017, para posteriormente llegar a diferentes localidades de los países circundantes a Bolivia y un porcentaje menor ser embarcado en diferentes puertos vecinos [5]. Al respecto, el comercio exterior de nuestro país tiene cinco convenios por el Pacífico: Antofagasta, Arica e Iquique (Chile) Matarani⁴ e Ilo⁵ (Perú). Tres licencias portuarias por el Atlántico: Nueva Palmira (Uruguay) y Villeta (Paraguay) que ofrecen un depósito franco⁶ respectivamente, y una zona franca⁷ otorgada en Rosario (Argentina). [4]

⁴ Aún teniendo una significativa ampliación desde 2007 en su capacidad de carga de 133000 a 998000 (t por año), este puerto, para el comercio exterior boliviano es una opción limitada por el costo del flete carretero (104 dólares americanos por t). Además de no ejercer soberanía sobre la terminal portuaria de Matarani por parte de nuestro país. [2]

⁵ Por su capacidad de carga (5000 t) e infraestructura es muy limitado (ausencia de rompe olas que permita a las embarcaciones operar en temporadas críticas), la vigencia de la concesión es por 90 años, vigente a partir de la suscripción de los convenios complementarios (2010). Otra desventaja está en el costo del transporte carretero de 1311 km para productos del oriente boliviano (82 dólares americanos por t), frente a un recorrido de 649 km navegables en un día de viaje hasta el sistema portuario del canal Tamengo que cuestan (75 dólares americanos por t). [2]

⁶ Almacén que admite productos extranjeros libres del pago de gravámenes aduaneros por un plazo determinado o no salgan del depósito para su venta interna. [3]

⁷ Área de un país delimitada geográficamente bajo régimen fiscal y aduanero especial, donde se pueden efectuar tareas industriales de producción, comercialización de bienes para exportación o reexportación, además de prestar servicios de logística vinculados con el comercio internacional (almacenamiento, transporte, seguros, etc.). [3]

El puerto de Paranaguá en Brasil, es otro convenio que aun no tiene definido si es depósito o zona franca [4]. Accediendo a estos espacios portuarios a través de la Hidrovía Paraguay – Paraná (HPP) que se extiende desde puerto Cáceres Brasil, hasta puerto Nueva Palmira Uruguay. Enlazándose Bolivia con la HPP, por el Sistema Fluvial Portuario Canal Tamengo SFPCT, donde se localizan los puertos Jennefer⁸, Aguirre⁹, Gravetal¹⁰ y el canal de Tamengo.¹¹ [6], ver figura 1.



HIDROVÍA PARANÁ-PARAGUAY (HPP): Sistema navegable con una extensión de 3442 km, va desde Puerto Cáceres (Mato Grosso-Brasil) hasta Nueva Palmira (Uruguay), más 250 km hasta el ingreso marítimo. Via Internacional de transporte fluvial con salida al océano Atlántico, compartida por: Argentina, Bolivia, Brasil, Paraguay y Uruguay.

Fuente: Elaboración propia extractando información de [2] y [6]

Figura 1: Sistema Tamengo, acceso fluvial – marítimo de Bolivia sobre el Océano Atlántico

⁸ Su objetivo es desarrollar el comercio exterior boliviano promocionando fletes 20 a 30 por ciento más bajos a los que se tiene en puertos chilenos. [2]

⁹ La infraestructura portuaria está ubicada en puerto Quijarro, provincia Germán Busch, departamento de Santa Cruz, frontera con Brasil. Complejo portuario y zona franca comercial industrial, tiene plataformas de embarque y desembarque, terminales de carga, muelles especializados, instalaciones para el manejo de carga intermodal, productos a granel, embolsado, líquido (aceites comestibles e hidrocarburos) y todo tipo de carga general suelta o en contenedor. Tiene acceso a carreteras, más de seis km de desvíos ferroviarios, puertos fluviales del Brasil, Paraguay, Uruguay y Argentina, aeropuertos de Pto Suárez (Bolivia) y Corumbá (Brasil), ambos a 10 km. de su zona franca. [2]

¹⁰ Tiene dos puertos propios con infraestructura portuaria para el transporte, recepción y embarque de materia prima. Se encuentra en la zona de puerto Quijarro, arroyo Concepción, sobre la frontera entre Bolivia y Brasil a 600 Km. [2], [4]

¹¹ Canal natural-artificial de 11 km de largo que conecta la Laguna Cáceres cerca de Puerto Suárez (Bolivia) con el río Paraguay frente a la ciudad de Corumbá (Brasil). [2], [6]

A este sistema SFPCT también puede agregarse, puerto Bush con 48 kilómetros de ribera sobre el río Paraguay, único puerto en territorio boliviano, con soberanía sobre aguas internacionales. Es así que implementado el puerto multipropósito más la vía férrea Motacucito-Mutún-Puerto Busch, la capacidad de carga de puerto Bush aumentaría notablemente. [2]

Matriz exportable de Bolivia

El resumen de la matriz exportable actual, se presenta en la tabla 2.

Tabla 2
Actual matriz exportable de Bolivia 2017

(*)	Carga Ultramar (kg)	Carga países Vecinos (kg)	Valor Ultramar (Sus)	Valor países vecinos (Sus)
1	995.765.521		1.660.382.629	
2		12.319.981.005		1.597.959.502
3	805.690.914		1.364.503.695	
4		40.130.062		1.306.145.053
5		8.803.148.558		1.257.548.840
6	393.508.457	471.927.328	167.389.116	216.872.190
7	121.376.968		106.125.428	
8	141.330.383		52.261.701	
9		87.556.817		37.604.312
10	80.542.297		33.324.646	
11		214.202.085		30.364.925
12	14.075.339		5.924.011	
13		1.790.226		3.742.994
14		6.788.099		3.419.946
15		2.359.614		1.932.933
16		185.122		560.822
Total	2.552.289.879	21.948.068.916	3.389.911.226	4.456.151.517
Total		24.500.358.795	Total	7.846.062.743

(*): 1) Uyuni - Ollague - Antofagasta. 2) Puerto Suárez - Corumbá. 3) Tambo Quemado - Charaña - Arica. 4) AÉREA. 5) Yacuiba -Pocitos. 6) Desaguadero. 7) Bella Vista - Pisiga - Iquique. 8) Charaña - Arica. 9) Boyuibe - Fortín Villazón. 10) Puerto Quijarro - Arroyo Concepción SFPCT. 11) San Ignacio- San Vicente- San Matías. 12) Apacheta -Antofagasta. 13) Guayaramerín- Cobija - Amazonas. 14) Bermejo - Orán. 15) Villazón- La Quiaca. 16) Zonas Francas.

Fuente: Elaboración propia sobre información preliminar de [1], [4], [5] y [7]

Actual estructura portuaria de Bolivia

En general la carga de exportación boliviana, utiliza en mayor proporción tres puertos localizados en Chile, uno en el Perú (vía Pacífico) y el SFPCT Sistema Fluvial Portuario Canal de Tamengo que a través de la HPP vincula el acceso de las exportaciones hacia ultramar (vía Atlántico). La tabla 3, contiene una relación preliminar para la carga y valor exportado por cada puerto a ultramar el año 2017.

Tabla 3
Carga y valor exportado desde Bolivia a ultramar 2017

PUERTO	Carga ultramar (kg)	p*	Valor ultramar (Sus)	p*
Antofagasta	1.009.840.860	0,396	1.666.306.640	0,492
Arica	947.021.297	0,371	1.416.765.396	0,418
Iquique	121376968	0,048	106.125.428	0,031
Matarani	393.508.457	0,154	167.389.116	0,049
SFPCT	80.542.297	0,032	33.324.646	0,010
Total	2.552.289.879	1,000	3.389.911.226	1,000

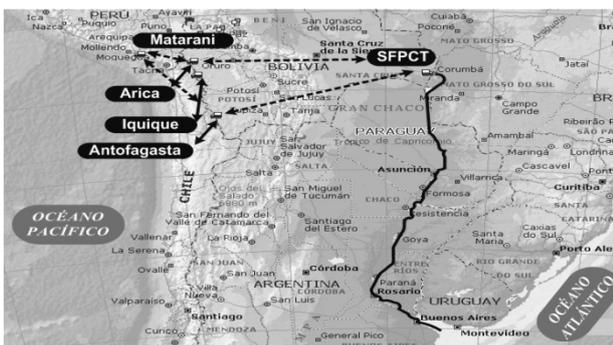
p*: Proporción

Fuente: Elaboración propia sobre información preliminar de [1], [4], [5] y [7]

La relación mostrada en la tabla 3, permite establecer que por los tres puertos chilenos se transporta a ultramar alrededor del 94,1 y 81,5 por ciento en valor y carga, del total exportado hacia ultramar. Significativa dependencia que el país tiene por estos puertos [8], causada por el enclaustramiento marítimo y la menor distancia para el transporte histórico de minerales desde las minas del occidente boliviano hasta ultramar, característica que aun se mantiene y marca las exportaciones actuales por estos tres puertos [9], no obstante, en los últimos años se han ido proponiendo nuevas vías de exportación a través de los puertos peruanos y el Sistema Fluvial Portuario Tamengo SFPCT (conexión HPP - Océano Atlántico), en la búsqueda de opciones que disminuyan o eliminen esta dependencia, ofreciendo al país nuevas condiciones para el comercio internacional.

Planteamiento temático

Bajo esta nueva perspectiva, en el presente artículo, se estudia una posible estrategia¹² en función del tiempo y sus consecuencias para migrar el movimiento exportable de carga y valor hacia el puerto de Matarani (Perú) y el SFPCT (Pto. Quijarro - Arroyo Concepción, Santa Cruz - Bolivia). Aplicando un proceso estocástico de Cadenas Finitas de Markov (FMC), al movimiento de carga y valor portuario exportable de Bolivia y su acceso al Océano Pacífico (territorio peruano) y hacia el Océano Atlántico (utilizando el Canal Tamengo y la HPP).



Plano cartográfico: Microsoft Corporation, Encarta 2009

DESARROLLO

Proceso estocástico

Afecta a todo proceso (conjunto de etapas sucesivas de un fenómeno natural o de una operación artificial), que se desarrolla y controla siguiendo una ley de probabilidad, ley que a su vez dependen del tiempo. Así, un proceso estocástico discreto o continuo es una serie de variables aleatorias (probabilidades) que proveen una descripción de la evolución de un determinado fenómeno a través del tiempo. Mostrando todos los valores posibles que puede tomar la variable aleatoria X_t .

Axiomas relacionados con las Cadenas de Markov

Una sucesión de observaciones X_1, X_2, \dots, X_n se define como un proceso estocástico, cuando sus valores no se pueden predecir exactamente; sin embargo, se consigue especificar estos valores en función del tiempo, aplicando probabilidades. Así, para cada estado inicial s_1 y sucesivos espacios s_n de los estados $X_n, n = 2, 3, \dots$, la probabilidad de estos estados X_n en relación al espacio muestral s , se representa por la probabilidad condicional:

$$P(X_{n+1} = s_{n+1} | X_1 = s_1, X_2 = s_2, \dots, X_n = s_n)$$

Cadenas de Markov: Proceso estocástico especial donde la probabilidad del estado futuro X_{n+1} no depende de los estados anteriores X_1, \dots, X_{n-1} , pero sí depende del estado actual X_n . Es decir, que para $n = 1, 2, \dots$, y cualquier sucesión de estados s_1, \dots, s_{n+1} la probabilidad condicional es:

$$P(X_{n+1} = s_{n+1} | X_1 = s_1, X_2 = s_2, \dots, X_n = s_n) = P(X_{n+1} = s_{n+1} | X_n = s_n)$$

Cadena de Markov finita: Cadena de Markov para la que existe sólo un número finito k de estados posibles s_1, \dots, s_k y en cualquier instante de tiempo, está en uno de estos k estados.

Probabilidad de transición

Corresponde a la probabilidad condicional:

$$P(X_{n+1} = s_j | X_n = s_i)$$

Probabilidad de transición estacionaria

Una cadena de Markov tiene probabilidades de transición estacionarias si para cualquier par de estados s_i y s_j existe una probabilidad de transición p_{ij} tal que:

$$P(X_{n+1} = s_j | X_n = s_i) = p_{ij} \text{ para } n = 1, 2, \dots$$

Matriz estocástica

Matriz cuadrada cuyos elementos son no negativos y la suma de los elementos de cada fila es igual a 1.

Matriz de transición en un solo paso

Dada una cadena de Markov con k estados posibles s_1, \dots, s_k y probabilidades de transición estacionarias.

$$Si \quad p_{ij} = P(X_{n+1} = s_j | X_n = s_i) = \begin{pmatrix} p_{11} & \dots & p_{1k} \\ p_{21} & \dots & p_{2k} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ p_{k1} & \dots & p_{kk} \end{pmatrix}$$

La matriz de transición P para cualquier cadena de Markov finita con probabilidades de transición estacionarias, también se define como una matriz estocástica.

Matriz de transición en varios pasos

Para una cadena de Markov con k posibles estados s_1, \dots, s_k , y $p_{ij}^{(2)}$ elemento de la i -ésima fila y j -ésima columna de la matriz P^2 es igual a:

$$p_{ij}^{(2)} = P(X_{n+2} = s_j | X_n = s_i)$$

Generalizando

$$P^m : \text{Potencia } m\text{-ésima de } P, \text{ con } (m = 2, 3, \dots)$$

$$p_{ij}^{(m)} : \text{Elemento de la fila } i \text{ y de la columna } j \text{ de la matriz } P^m$$

P^m es la matriz de probabilidades $p_{ij}^{(m)}$ para que la cadena cambie del estado s_i al estado s_j en m pasos; para cualquier valor de $m, (m = 2, 3, \dots)$, por lo tanto P^m es la matriz de transición de m pasos.

Vector de probabilidad inicial

$$\text{Vector de probabilidad } v = (v_1, \dots, v_k)$$

El vector de probabilidad inicial y la matriz de transición fijan la probabilidad estado de la cadena en un instante de tiempo, considerando la multiplicación de matrices fila-columna vP .

Propiedades de la multiplicación fila-columna que establecen la probabilidad estado de la cadena en un instante de tiempo:

- Suma de probabilidades de los estados igual a 1.
- Matriz de transición cuadrada (fxc) f=c.
- Las probabilidades de transición deben estar entre 0 y 1.

¹² En un proceso regulable, corresponde al conjunto de reglas que aseguran una decisión óptima en cada momento.

Además, si las probabilidades de los diversos estados en el instante n se especifican por el vector de probabilidades w , entonces, las probabilidades en el instante $n + 1$, se describen de acuerdo con el vector de probabilidades wP .

Aplicación

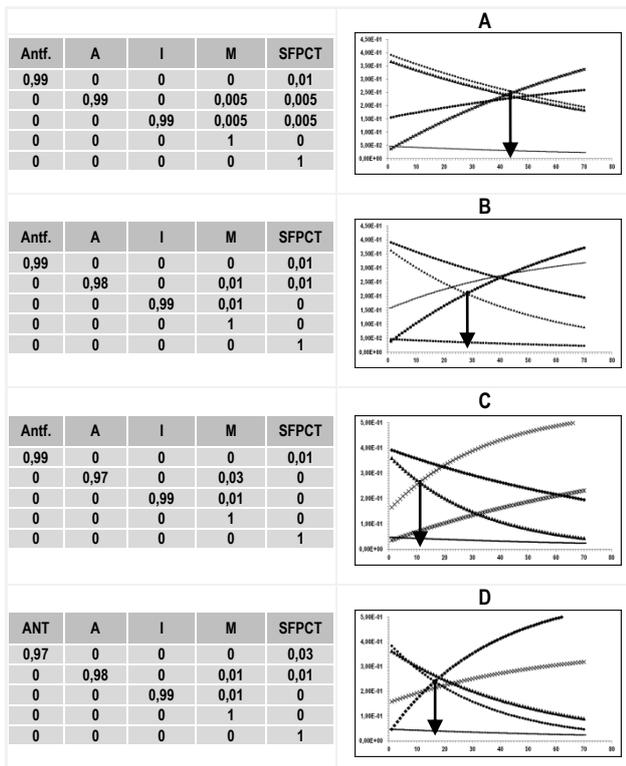
Asumiendo que las proporciones pueden representarse como probabilidades, los porcentajes de participación (tabla 3, estructura portuaria actual), establecen el vector de probabilidad inicial, así para la carga será:

$$v_{carga} = (0,396_{Antf.}) (0,371_{Ar.}) (0,048_{Iq.}) (0,154_{Mat.}) (0,032_{SFPCT})$$

Con relación a la matriz de transición, se consideraron diferentes alternativas. En la figura 2, se tienen cuatro matrices de transición (acción), con diferentes alternativas de movimiento desde puertos chilenos a Matarani (Perú) y al SFPCT, que originaron un proceso de cálculo iterativo y la respectiva concentración de resultados para cada componente portuario del vector principal (diagrama de dispersión). Identificándose que cuanto menor es el porcentaje asignado para el movimiento de carga, la concentración de puntos discretos está a mayor número de iteraciones. Caso A y viceversa caso D movimiento de carga de Antofagasta (ANT) a SFPCT, Caso B y C movimiento carga Arica (A) a Matarani (M).

$$P_{ij}^{(m)} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} & p_{35} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} & p_{45} \\ p_{51} & p_{52} & p_{53} & p_{54} & p_{55} \end{pmatrix}^m$$

$$P^m = v_{carga} P_{ij}^{(m)} \text{ (Iteración)}$$

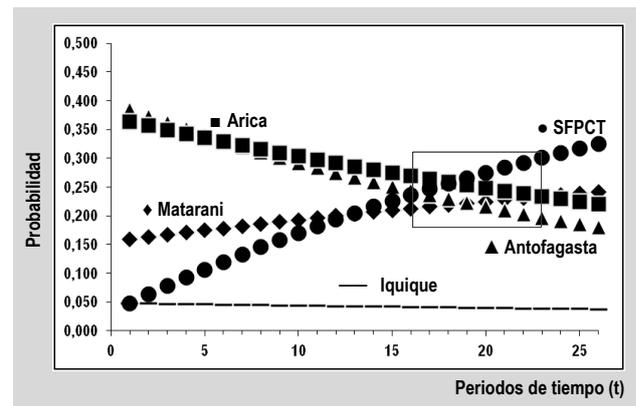


Fuente: Elaboración propia, proceso iterativo EXCEL

Figura 2: Matrices de transición, con diferentes alternativas de movimiento desde puertos chilenos a Matarani (Perú) y al SFPCT, proceso de cálculo iterativo y la respectiva concentración de resultados para cada componente portuario del vector principal (diagramas de dispersión)

Entre las diferentes alternativas para la matriz de transición, una que concentra los resultados en un menor número de iteraciones es la correspondiente al caso D (figura 2), ampliada en la figura 3 y útil para la estrategia propuesta.

Complementa a este diagrama de dispersión P^m , la matriz de transición iterada en m pasos, introduciendo en cada repetición, un nuevo vector v .



t	SFPCT	Antofagasta	t	Matarani	Arica	Iquique
5	0,106	0,340	5	0,174	0,335	0,046
10	0,170	0,292	10	0,193	0,303	0,043
15	0,226	0,251	15	0,209	0,274	0,041
16	0,236	0,243	16	0,212	0,269	0,041
17	0,246	0,236	17	0,215	0,263	0,040
18	0,256	0,229	18	0,218	0,258	0,040
19	0,265	0,222	19	0,221	0,253	0,040
20	0,274	0,215	20	0,224	0,248	0,039
21	0,283	0,209	21	0,227	0,243	0,039
22	0,292	0,203	22	0,230	0,238	0,038
23	0,300	0,197	23	0,233	0,233	0,038
24	0,309	0,191	24	0,236	0,228	0,038
25	0,317	0,185	25	0,238	0,224	0,037
26	0,324	0,179	26	0,241	0,219	0,037
30	0,354	0,159	30	0,251	0,202	0,036
35	0,386	0,136	35	0,262	0,183	0,034
40	0,414	0,117	40	0,273	0,165	0,032
50	0,460	0,086	50	0,291	0,135	0,029
60	0,495	0,066	60	0,306	0,110	0,026
70	0,522	0,048	70	0,319	0,090	0,024

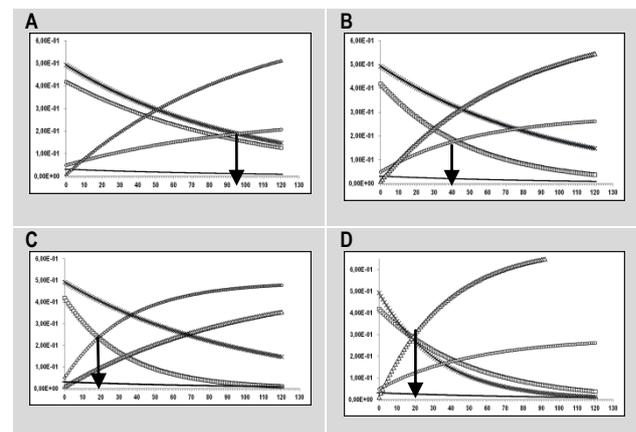
Fuente: Elaboración propia, proceso iterativo EXCEL

Figura 3: Diagrama de dispersión ampliada, matriz de transición caso D, e iteración en función del tiempo movimiento de carga

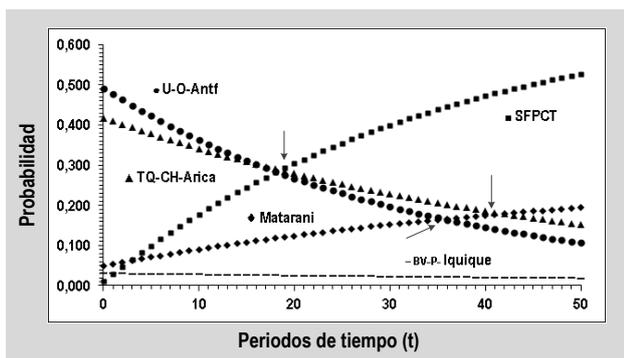
Una tendencia equivalente se presenta al iterar las proporciones (probabilidades) para el vector inicial del valor:

$$v_{valor} = (0,492_{Antf.}) (0,418_{Ar.}) (0,031_{Iq.}) (0,049_{Mat.}) (0,010_{SFPCT})$$

que en relación con la matriz de transición (cuatro alternativas), proporciona los siguientes diagramas de dispersión: caso A y D movimiento de valor de Antofagasta (ANT) a SFPCT, caso B y C movimiento de valor Arica (A) a Matarani (M):



El diagrama ampliado (caso D) y la iteración en función del tiempo, se representan en la figura 4.



t	Antofagasta	SFPCT	t	Arica	Matarani	Iquique
0	0,492	0,010	0	0,418	0,049	0,031
15	0,312	0,245	15	0,309	0,108	0,027
16	0,302	0,258	16	0,303	0,111	0,026
17	0,293	0,270	17	0,296	0,115	0,026
18	0,284	0,281	18	0,291	0,118	0,026
19	0,276	0,293	19	0,285	0,121	0,026
20	0,268	0,304	20	0,279	0,124	0,025
25	0,230	0,355	25	0,252	0,139	0,024
30	0,197	0,400	30	0,228	0,152	0,023
35	0,169	0,439	35	0,206	0,164	0,022
40	0,145	0,472	40	0,186	0,175	0,021
41	0,141	0,479	41	0,183	0,177	0,021
42	0,137	0,485	42	0,179	0,179	0,020
43	0,133	0,491	43	0,175	0,181	0,020
50	0,107	0,528	50	0,152	0,194	0,019
55	0,092	0,550	55	0,138	0,202	0,018

Fuente: Elaboración propia, proceso iterativo EXCEL

Figura 4: Diagrama de dispersión ampliada, matriz de transición caso D, e iteración en función del tiempo, movimiento en valor

Análisis de resultados

Las iteraciones producto fila-columna que calculan el vector respectivo en función del tiempo, (movimiento de carga y valor portuario), en ambos casos, proporcionan puntos discretos (resultados) siguiendo una disposición característica (figuras 2, 3 y 4) y concentran estos puntos en zonas definidas o comunes. Estableciendo tanto para la carga como para el valor, dos tendencias competitivas antagónicas importantes, La primera SFPCT – Antofagasta y la segunda Arica – Matarani e influencia de Iquique. Ilustraciones 1 y 2 (movimiento de carga).

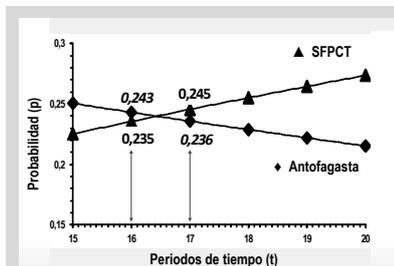


Ilustración 1
Combinación competitiva, SFPCT – Antofagasta
Movimiento de carga
Probabilidad de 0,235 a 0,245
Periodo de tiempo entre 16 y 17

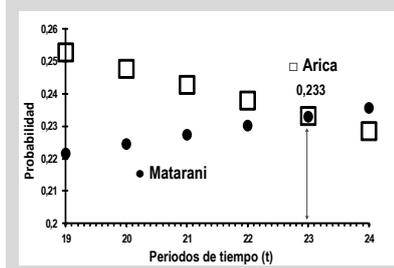


Ilustración 2
Combinación competitiva, Arica – Matarani
Movimiento de carga
Probabilidad 0,233
Periodo de tiempo 23

Para la carga, combinación SFPCT-Antofagasta, los puntos ascendentes como los descendentes se agrupan en el intervalo 16 a 17, por lo tanto para llegar al punto común de intersección, el tratamiento implicaría considerar el tiempo de manera continua (valores consecutivos sobre la recta real).

En la segunda combinación Arica-Matarani, las tendencias convergen en un determinado punto común coordenadas 23 y 0,233, en consecuencia la variable tiempo podría ser considerada discreta (sólo para Z+ números naturales positivos). Comportamiento que también es similar para las iteraciones del valor de movimiento portuario.

Si bien el producto matriz-fila, proporciona valores para el vector de estado asumiendo periodos de tiempo discretos, se desarrollaron las siguientes expresiones seriales (Ec. 1a y 1b) para la probabilidad (vector de estado) en función del tiempo, que pueden ser utilizadas tanto para periodos de tiempo continuo o discretos:

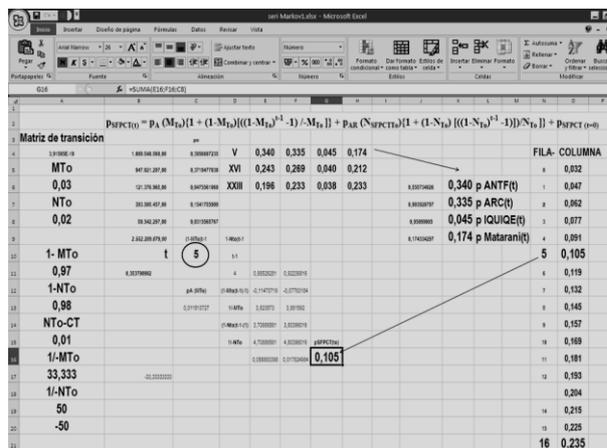
$$(1a) p_A(t) = p_A(M_A)^t$$

$$(1b) p_C(t) = \left\{ \begin{aligned} &p_A(M_{A \rightarrow C}) [I + \sum_{i=1}^{k=t-1} (I - M_{A \rightarrow C})^{t-i}] \\ &+ p_B(N_{B \rightarrow C}) [I + \sum_{i=1}^{k=t-1} (I - N_{B \rightarrow C})^{t-i}] \\ &+ p_C(t=0) \end{aligned} \right\}$$

t ≥ 0 Var. continua, t = 1, 2, 3..... Var. discreta

p_{A(t)} = Probabilidad componente A, cambio de estado en función del tiempo, M_A = Descuento total Movimiento de A (matriz de transición), p_{C(0)} = Probabilidad componente C, cambio de estado en función del tiempo, M_{A→C} = Descuento parcial Movimiento de A (matriz de transición) a favor del componente C, p_A = Probabilidad componente A, vector inicial, p_B = Probabilidad componente B, vector inicial, N_{B→C} = Descuento parcial Movimiento de B (matriz de transición) a favor del componente C, N_{B→C} = Descuento total Movimiento de B (matriz de transición) a favor de los componente C, T, p_{C(t=0)} = Probabilidad componente C, vector inicial.

Aplicación y sistema de cálculo: La figura 5, muestra una hoja desarrollada para Excel, a partir de las expresiones seriales indicadas en el parágrafo anterior que calcula las probabilidades modificando la variable t (número marcado en círculo) y compara con el valor obtenido producto fila-columna (iteración cadena de Markov).



Iteración	pSFPCT	pAntofagasta	pMatarani	pArica	pIquique
5	0,105	0,340	0,174	0,335	0,045

Fuente: Elaboración propia, cálculo serial EXCEL

Figura 5: Sistema de cálculo expresiones seriales 1a y 1b variable t discreta. Combinación Antofagasta-SFPCT (carga)

El análisis efectuado puede extenderse aun más, pero para el propósito de la estrategia de migración de carga/valor portuario, proporciona datos importantes, sobre los cuales es posible proyectar el comportamiento a futuro y la acción inicial de movimiento que permita disminuir la dependencia de puertos chilenos que actualmente tiene Bolivia.

CONCLUSIONES

El proceso estocástico Cadenas Finitas de Markov CFM, ejercicio matemático aplicado iterativamente (producto fila-columna), además complementado con expresiones seriales para determinar probabilidades en función del tiempo por separado. Permiten plantear la acción inicial del movimiento de carga/valor portuario, y proyectar su comportamiento futuro, considerando los siguientes aspectos de investigación operativa:

Elegida una matriz de transición cautelosa que permita mover cantidades pequeñas de carga para la migración portuaria, esta, corresponde a transferir anualmente:

- 3 porciento carga total de Antofagasta hacia el SFPCT,
- 2 porciento carga total de Arica a Matarani y SFPCT 1:1,
- 1 porciento carga total de Iquique a Matarani.

Las proporciones de participación base para carga y valor portuario (tabla 3), son tomadas en cuenta como probabilidades individuales que conforman los vectores iniciales:

$$v_{carga} = (0,396_{Antf.}) (0,371_{Aric.}) (0,048_{Iq.}) (0,154_{Mat.}) (0,032_{SFPCT})$$

$$v_{valor} = (0,492_{Antf.}) (0,418_{Aric.}) (0,031_{Iq.}) (0,049_{Mat.}) (0,010_{SFPCT})$$

Efectuado el proceso de iteración producto fila-columna movimiento de carga, para la combinación competitiva Antofagasta-SFPCT, si bien el aumento y descenso es gradual, de la iteración 16 (16 años) en adelante la participación es significativa, aumentando SFPCT de 3,2 a 23,6 porciento y disminuyendo el puerto de Antofagasta del 39,6 al 24,3 por ciento, manteniendo una tendencia decreciente. Para la combinación Arica-Matarani, el comportamiento es similar, y se esperaría que a partir de la iteración 23 (23 años) el puerto de Matarani vaya a incrementar su movimiento de carga del 15,4 al 23,3 porciento, y el puerto de Arica reduzca su participación del 37,1 al 23,3 porciento, manteniéndose casi invariable el puerto de Iquique. El mismo comportamiento se tiene para el cambio de participación en valor, notándose que los periodos de tiempo para estos cambios significativos son mayores. Ver tabla 4.

Tabla 4
Cambios significativos participación portuaria proceso iterativo cadenas finitas de Markov

Movimiento de carga						
t	SFPCT	Antofagasta	t	Matarani	Arica	Iquique
16	23,6	24,3	16	21,2	26,9	4,1
23	30,0	19,7	23	23,3	23,3	3,8
Movimiento de valor						
t	Antofagasta	SFPCT	t	Arica	Matarani	Iquique
18	28,4	28,1	18	29,1	0,118	2,6
42	13,7	48,5	42	17,9	17,9	2,0

Fuente: Elaboración propia, proceso iterativo EXCEL

En consecuencia, tomando una decisión este año, para aprovechar la matriz de transición (estrategia) indicada anteriormente, cambios significativos en el movimiento de carga/valor que disminuyan la dependencia del comercio exterior de Bolivia en los puertos chilenos se pueden conseguir en un mínimo de 16 a 18 años. Si actualmente la dependencia en carga y valor para estos tres puertos respectivamente está alrededor de 81,5 y 91,4 porciento, en 18 años, es posible disminuir hasta el 55,3 y 59,1 porciento con tendencia marcada a la baja.

Proyección a mediano plazo, factible siempre y cuando se cualifique el tipo de exportación y la regularidad de las transferencias sean sostenibles, se disminuyan los fletes carreteros en general, se mejoren principalmente las condiciones de infraestructura y fluviales del SFPCT, se mantengan los acuerdos internacionales sobre el uso de las aguas de la Hidrovía Paraná-Paraguay HPP y con el Perú sobre el uso de puertos. Aspectos esenciales y complementarios entre otros de comercio exterior (políticas) que facilitarían el acceso y movimiento exportable de carga/valor hacia el puerto de Matarani, Perú (Océano Pacífico) y el Sistema Fluvial Portuario Canal Tamengo SFPCT (Pto. Quijarro, Arroyo Concepción, Santa Cruz - Bolivia) Océano Atlántico.

Referencias Bibliográficas:

- [1] IBCE Instituto Boliviano de Comercio Exterior, 2018, Cifras del comercio exterior boliviano 2017, publicación N° 259, Santa Cruz – Bolivia, PDF disponible en: www.ibce.org.bo/publicaciones-descarga.php?id=2412&opcion=1,
- [2] IBCE Instituto Boliviano de Comercio Exterior, 2017, Hidrovía Paraná – Paraguay HPP, publicación N° 254, Santa Cruz – Bolivia, PDF disponible en: ibce.org.bo/images/.../ce-254-Hidrovía-Paraguay-Parana,
- [3] IBCE Instituto Boliviano de Comercio Exterior, 2014, TPA Terminal Portuaria Arica, publicación N° 225, Santa Cruz – Bolivia, PDF disponible en: www.ibce.org.bo/.../ce-225-TPA-plataforma-comercio-exterior-boliviano,
- [4] Bolivia comercia con el mundo a través de 8 puertos del exterior www.paginasiete.bo/economia/2015/.../26/bolivia-comercia-mundo-traves-puertos-exterior-81467.html,
- [5] IBCE Instituto Boliviano de Comercio Exterior, 2016, Bolivia: Exportaciones al mundo según países destino, datos preliminares, Santa Cruz – Bolivia, PDF disponible en: ibce.org.bo/.../Bolivia-exportacion-segun-pais-de-destino-gestion-2016,
- [6] ABIRH Asociación Boliviana de Ingeniería de Recursos Hídricos 2008, La Navegabilidad del Canal Tamengo, Simposio importancia de las hidrovías en el desarrollo de Bolivia, Cochabamba – Bolivia, PDF disponible en: <https://www.bcr.com.ar/.../3.2%20La%20Navegabilidad%20del%20Canal%20Tamengo>,
- [7] IBCE Instituto Boliviano de Comercio Exterior, 2018, Bolivia: Exportaciones al mes de febrero del 2018, boletín electrónico 688, Santa Cruz – Bolivia, PDF disponible en: ibce.org.bo/ibcecifras/index.php?id=632, 10 Abr 2018,
- [8] La capacidad portuaria de Chile, rebasada por Bolivia – ASP-B www.aspb.gob.bo/.../la-capacidad-portuaria-de-chile-rebasada-por-bolivia/,
- [9] Empresarios bolivianos acusan "rebase" de puertos chilenos pese a <https://portalportuario.cl/empresarios-bolivianos-acusan-rebase-de-puertos-chilenos-pese-a-inversiones-en-arica-y-antofagasta/>.

BIBLIOGRAFÍA

Gonzales, G. J.A., 1976, Técnicas operativas para la toma de decisiones. Segunda parte, Contexto aleatorio programación dinámica, cadenas de Markov, ISBN: 84-7087-160-9, Madrid – España,

Bronson, R., 1990, Teoría y problemas de investigación de operaciones, Parte II, métodos probabilísticos, capítulo 18 Cadenas finitas de Markov, Colección Schaum, Ed. McGraw – Hill Interamericana, ISBN: 968-451-385-2, México,

Miller, I.R.T., Freund, E.J., Johnson, R., 1994, Probabilidad y estadística para ingenieros, Capítulo 3 Probabilidad, Cuarta Edición, Ed. Prentice Hall Hispanoamericana S.A., ISBN: 0-13-712-761-8, México,

Rendón, T. A., Rodríguez, f. J., Morales, A. A., 1998, Introducción al álgebra lineal y de matrices, aplicaciones con Excel, Capítulo 7 operaciones con matrices usando Excel, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, ISBN: 970-654-297-3, Xochimilco – México,

www.academia.edu > capitulo_10_cadenas de Markov, PDF,

Taha, H.A., 2012, Investigación de operaciones, Capítulo 17 Cadenas de Markov, Ed. Pearson Educación, novena edición, ISBN: 978-607-32-0796-6, México.

(*), Químico Industrial, Consultor Productividad, Calidad e Innovación Tecnológica, Diplomado Investigación Operativa, Editor Revista Tecnológica, Facultad de Tecnología – UMSA.