

# Simulación Aplicada a la Logística

Lectura Nr. 5

## Simulación Monte Carlo

**Profesor:**

Ricardo Caballero, M.Sc.

✉ [ricardo.caballero@utp.ac.pa](mailto:ricardo.caballero@utp.ac.pa)



## Ejemplo 1: Simulación con problemas de teoría de colas

---

- El tiempo entre llegadas de los clientes a la peluquería HairKare es exponencial con media de 15 minutos. La peluquería es atendida por solo un peluquero, y se lleva entre 10 y 15 minutos, distribuidos de manera uniforme, para realizar un corte de pelo. Los clientes son atendidos con base en la disciplina primero en llegar, primero en salir (FIFO).
- El objetivo de la simulación es calcular las siguientes medidas de desempeño:
  - La utilización promedio de la peluquería
  - La cantidad promedio de clientes que esperan
  - El tiempo promedio que un cliente espera en la cola

La lógica del modelo de simulación se puede describir en función de las acciones asociadas con los eventos de llegada y salida del modelo

Simular solo las primeras 5 llegadas

## Ejemplo 1: Datos del problema

---

- Tiempo de llegadas
  - distribución exponencial
  - Media de 15 minutos

$$t = -15 \ln R$$

- Tiempo de servicio
  - distribución uniforme
  - Entre 10 a 15 minutos

$$t = a + (b - a)R$$
$$t = 10 + 5R$$

- Número de servidores
  - 1 peluquero

## Ejemplo 1: Tabla de números aleatorios

---

**TABLA 19.1** Una lista breve de números aleatorios 0-1

.0589	.3529	.5869	.3455	.7900	.6307
.6733	.3646	.1281	.4871	.7698	.2346
.4799	.7676	.2867	.8111	.2871	.4220
.9486	.8931	.8216	.8912	.9534	.6991
.6139	.3919	.8261	.4291	.1394	.9745
.5933	.7876	.3866	.2302	.9025	.3428
.9341	.5199	.7125	.5954	.1605	.6037
.1782	.6358	.2108	.5423	.3567	.2569
.3473	.7472	.3575	.4208	.3070	.0546
.5644	.8954	.2926	.6975	.5513	.0305

## Ejemplo 1: Llegada del cliente 1 en el instante $t = 0$

---

- Debido a que la instalación está ociosa en el instante  $t = 0$ , el cliente inicia el servicio de inmediato
- Genere la **llegada del cliente 2** en el instante

$$t = 0 + [-15 \ln R]$$

$$t = 0 + [-15 \ln(0.0589)]$$

$$t = 42.48 \text{ minutos}$$

- La **salida del cliente 1** se calcula de la siguiente manera

$$t = 0 + (10 + 5R)$$

$$t = 0 + [10 + (5 \times 0.6733)]$$

$$t = 13.37 \text{ minutos}$$

## Ejemplo 1: Salida del cliente 1 y llegada de cliente 2

---

- Debido a que la cola esta vacía, la instalación se declara ociosa. Al mismo tiempo, registramos que la instalación ha estado ocupada entre  $t = 0$  y  $t = 13.37$  minutos
- Llegada del cliente 2 en el instante  $t = 42.48$ .
- El **cliente 3 llegara** en el instante

$$t = 42.48 + [-15 \ln R]$$

$$t = 42.48 + [-15 \ln(0.4799)]$$

$$t = 53.49 \text{ minutos}$$

- Debido a que la instalación esta ociosa, el cliente 2 inicia el servicio y la instalación se declara ocupada.
- La **salida del cliente 2** se calcula de la siguiente manera

$$t = 42.48 + (10 + 5R)$$

$$t = 42.48 + [10 + (5 \times 0.9486)]$$

$$t = 57.22 \text{ minutos}$$

## Ejemplo 1: Llega cliente 3 en el instante $t = 53.49$

---

- El **cliente 3** llegara en el instante  $t = 53.49$  minutos
- Debido a que actualmente la instalación esta ocupada hasta  $t = 57.22$  minutos, el cliente 3 se coloca en la cola en el instante  $t = 53.49$
- El **cliente 2** sale en el instante  $t = 57.22$ . El cliente 3 se retira de la cola para iniciar el servicio.
- El **cliente 3** tiene un tiempo de espera de

$$W_3 = 57.22 - 53.49 = 3.73 \text{ minutos}$$

## Ejemplo 1: Llega cliente 4

---

- El **cliente 4** llegara en el instante

$$t = 53.49 + [-15 \ln(0.61.39)]$$

$$t = \mathbf{60.81 \textit{ minutos}}$$

- Debido a que actualmente la instalación esta ocupada, el cliente 4 se coloca en la cola

- El **cliente 3** sale en el instante

$$t = 57.22 + [10 + (5 \times 0.5933)]$$

$$t = \mathbf{70.19 \textit{ minutos}}$$

## Ejemplo 1: Llega cliente 5

---

- El **cliente 5** llegara en el instante

$$t = 60.81 + [-15 \ln(0.9341)]$$

$$t = \mathbf{61.83 \text{ minutos}}$$

- La simulación se limita a 5 llegadas, por consiguiente no se generan más. La instalación sigue ocupada porque el cliente se coloca en la cola
- Sale el cliente 3 en el instante  $t = 70.19$ , por consiguiente entra el cliente 4
- El **cliente 4 sale** en el instante

$$t = 70.19 + [10 + (5 \times 0.1782)]$$

$$t = \mathbf{81.08 \text{ minutos}}$$

## Ejemplo 1: Sale el cliente 4, entra el cliente 5

---

- El cliente 5 saldrá en el instante

$$t = 81.08 + [10 + (5 \times 0.3473)]$$

$$t = 92.82 \text{ minutos}$$

- No hay más clientes en el sistema, la simulación termina.

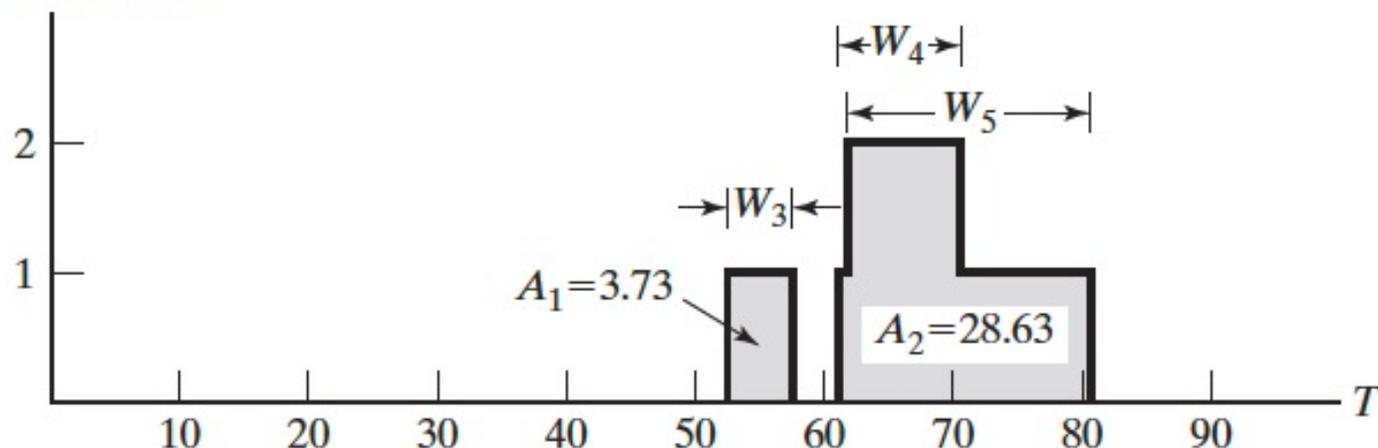
## Ejemplo 1: Lista de eventos

---

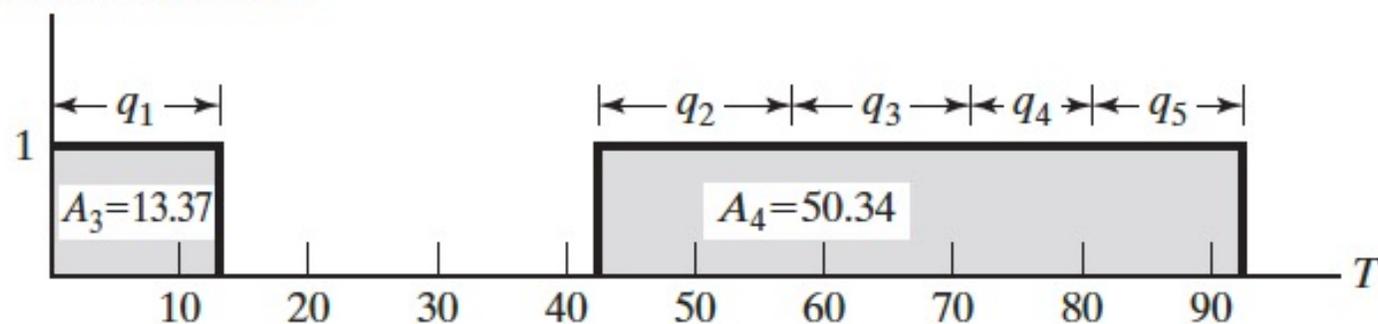
Tiempo (minutos)	Evento
13.37	Sale cliente 1
42.48	Llega cliente 2
53.49	Llega cliente 3
57.22	Sale cliente 2
60.81	Llega cliente 4
61.83	Llega cliente 5
70.19	Sale cliente 3
81.08	Sale cliente 4
92.82	Sale cliente 5

# Ejemplo 1: Cambios en la longitud de la cola y de utilización de instalación como una función del tiempo de simulación T

Longitud de la cola



Utilización de la instalación



## Ejemplo 1: Características de operación

---

- La longitud de la cola y la utilización de la instalación se conocen como variables basadas en el tiempo porque su variación es una función del tiempo. Por consiguiente, sus valores promedios se calcula de la siguiente manera

$$\text{Valor promedio de una variable basada en el tiempo} = \frac{\text{área bajo la curva}}{\text{periodo simulado}}$$

- El tiempo de espera promedio en la cola es una variable basada en observaciones. Por consiguiente su valor promedio se calcula de la siguiente manera

$$\text{Valor promedio de una variable basada en observaciones} = \frac{\text{Suma de las observaciones}}{\text{Cantidad de observaciones}}$$

## Ejemplo 1: Características de operación

---

*Longitud promedio de la cola*

$$L_q = \frac{\text{área bajo la curva}}{\text{periodo simulado}} = \frac{A_1 + A_2}{92.82} = \frac{32.36}{92.82} = 0.349 \text{ clientes}$$

*Utilización promedio de la instalación (% de tiempo que el peluquero está ocupado)*

$$\rho = \frac{\text{área bajo la curva}}{\text{periodo simulado}} = \frac{A_3 + A_4}{92.82} = \frac{63.71}{92.82} = 0.686$$

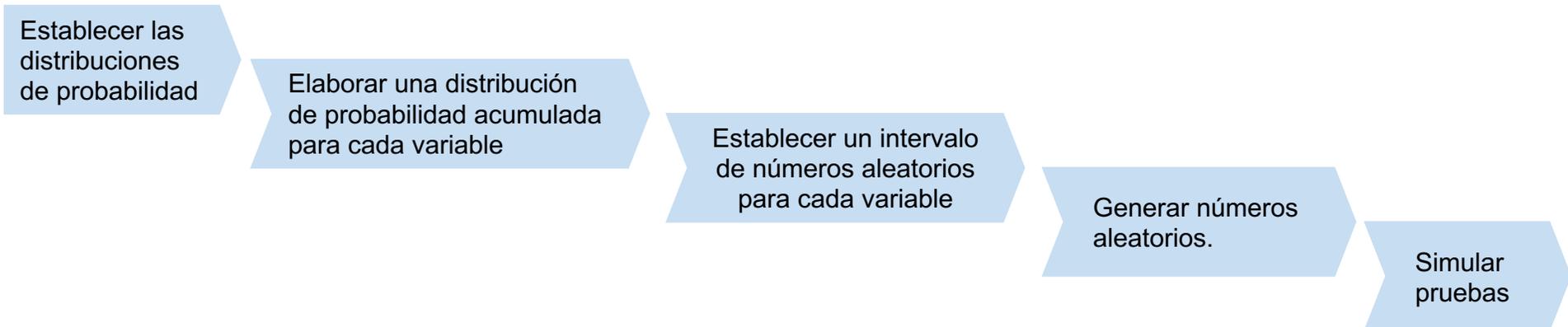
*Tiempo de espera promedio*

$$W_q = \frac{\text{Suma de las observaciones}}{\text{Cantidad de observaciones}} = \frac{W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5}{5}$$

$$W_q = \frac{0 + 0 + 3.73 + 9.38 + 19.25}{5} = 32.36 \text{ minutos}$$

# Simulación Monte Carlo

- Cuando un sistema contiene elementos que exhiben azar en su comportamiento, se puede aplicar el **método Monte Carlo de simulación**. Se basa en la experimentación sobre los elementos posibles (o probabilísticos) mediante el muestreo aleatorio.
- Unos cuantos ejemplo de estas variables son: demanda de un inventario diario o semanal, el tiempo de entrega para las órdenes del inventario, los tiempos entre descomposturas de las máquinas, los tiempos entre llegadas a las instalaciones de servicio, los tiempos de servicio, los tiempos para terminar las actividades de un Proyecto, el número de empleados ausentes en el trabajo cada día.
- La técnica se compone de los siguientes pasos:



## Ejemplo 2

Una empresa vende todo tipo de neumáticos, pero hay un neumático radial popular que representa gran parte de sus ventas totales. Como la empresa sabe que los costos de inventario pueden ser importantes con este producto, desea determinar una política para manejar su inventario. Para determinar como sería la demanda durante un periodo de tiempo, desea simular la demanda diaria durante varios días



Demanda de llantas	Días
0	10
1	20
2	40
3	60
4	40
5	30

## Ejemplo 2: Solución

---

### Paso 1. Establecer distribuciones de probabilidad

- Examinar los datos históricos y calcular su probabilidad de ocurrencia

Demanda de llantas	Días	Probabilidad de ocurrencia
0	10	<b>0.05</b>
1	20	<b>0.10</b>
2	40	<b>0.20</b>
3	60	<b>0.30</b>
4	40	<b>0.20</b>
5	30	<b>0.15</b>

## Ejemplo 2: Solución

---

### Paso 2. Elaborar una distribución de probabilidad acumulada para cada variable

- Una probabilidad acumulada es la probabilidad de que una variable (demanda) sea menor o igual que un valor específico.

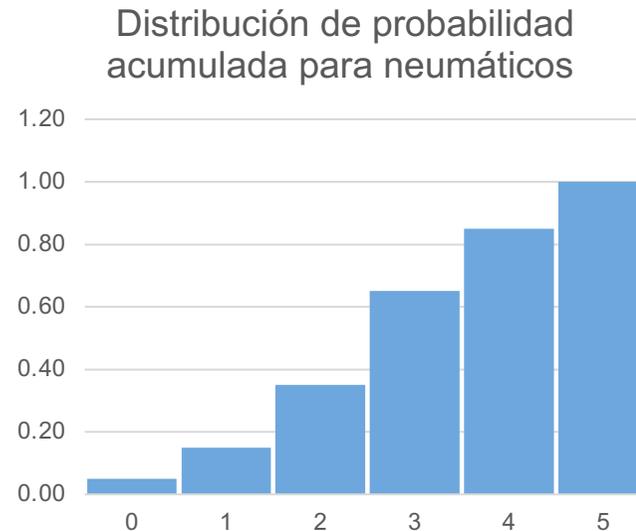
Demanda de llantas	Días	Probabilidad de ocurrencia	Frecuencia acumulada
0	10	0.05	<b>0.05</b>
1	20	0.10	<b>0.15</b>
2	40	0.20	<b>0.35</b>
3	60	0.30	<b>0.65</b>
4	40	0.20	<b>0.85</b>
5	30	0.15	<b>1.00</b>

## Ejemplo 2: Solución

### Paso 3. Establecer intervalos de números aleatorios

- Asignar un conjunto de números para representar cada valor o resultado posible.
  - Estos se conocen como **intervalos de números aleatorios**.
  - Un **número aleatorio** es una serie de dígitos que han sido seleccionados por un proceso totalmente aleatorio.
  - El rango de los intervalos de números aleatorios corresponde **exactamente** con la probabilidad de los resultados como se muestra

Representación gráfica de la distribución de probabilidad acumulada para las llantas radiales



## Ejemplo 2: Solución

---

Asignación de intervalos de números aleatorios para Auto Tire de Harry

Demanda de llantas	Días	Probabilidad de ocurrencia	Frecuencia acumulada	Intervalo de números aleatorios
0	10	0.05	0.05	<b>00 - 05</b>
1	20	0.10	0.15	<b>05 - 15</b>
2	40	0.20	0.35	<b>15 - 35</b>
3	60	0.30	0.65	<b>35 - 65</b>
4	40	0.20	0.85	<b>65 - 85</b>
5	30	0.15	1.00	<b>85 - 99</b>

# Ejemplo 2: Solución

## Paso 4. Generar números aleatorios

- Los números aleatorios se pueden generar de varias maneras.
- Si el problema es muy grande, se dispone de programas de software para generar los números aleatorios necesarios.
- El método manual más común es usar una tabla de números aleatorios.
- Porque todo es aleatorio en una tabla de números aleatorios, podemos seleccionar los números desde cualquier lugar de la tabla a utilizar en la simulación.

52	06	50	88	53	30	10	47	99	37	66	91	35	32	00	84	57	07
37	63	28	02	74	35	24	03	29	60	74	85	90	73	59	55	17	60
82	57	68	28	05	94	03	11	27	79	90	87	92	41	09	25	36	77
69	02	36	49	71	99	32	10	75	21	95	90	94	38	97	71	72	49
98	94	90	36	06	78	23	67	89	85	29	21	25	73	69	34	85	76
96	52	62	87	49	56	59	23	78	71	72	90	57	01	98	57	31	95
33	69	27	21	11	60	95	89	68	48	17	89	34	09	93	50	44	51
50	33	50	95	13	44	34	62	64	39	55	29	30	64	49	44	30	16
88	32	18	50	62	57	34	56	62	31	15	40	90	34	51	95	26	14
90	30	36	24	69	82	51	74	30	35	36	85	01	55	92	64	09	85
50	48	61	18	85	23	08	54	17	12	80	69	24	84	92	16	49	59
27	88	21	62	69	64	48	31	12	73	02	68	00	16	16	46	13	85
45	14	46	32	13	49	66	62	74	41	86	98	92	98	84	54	33	40
81	02	01	78	82	74	97	37	45	31	94	99	42	49	27	64	89	42
66	83	14	74	27	76	03	33	11	97	59	81	72	00	64	61	13	52
74	05	81	82	93	09	96	33	52	78	13	06	28	30	94	23	37	39
30	34	87	01	74	11	46	82	59	94	25	34	32	23	17	01	58	73
59	55	72	33	62	13	74	68	22	44	42	09	32	46	71	79	45	89
67	09	80	98	99	25	77	50	03	32	36	63	65	75	94	19	95	88
60	77	46	63	71	69	44	22	03	85	14	48	69	13	30	50	33	24
60	08	19	29	36	72	30	27	50	64	85	72	75	29	87	05	75	01
80	45	86	99	02	34	87	08	86	84	49	76	24	08	01	86	29	11
53	84	49	63	26	65	72	84	85	63	26	02	75	26	92	62	40	67
69	84	12	94	51	36	17	02	15	29	16	52	56	43	26	22	08	62
37	77	13	10	02	18	31	19	32	85	31	94	81	43	31	58	33	51



## Ejemplo 2: Solución

### Paso 5. Simulación del experimento

- Seleccionamos números aleatorios de la tabla
- El número que seleccione tendrá un rango correspondiente de la tabla
- Usamos la demanda diaria que corresponde a la gama de probabilidad alineada con el número aleatorio.

#### Simulación de 10 días de demanda de la llanta radial

SIMULACION DE DEMANDA DIARIA PARA 10 DIAS		
DIA	NÚMERO ALEATORIO	DEMANDA DIARA
1	52	<b>3</b>
2	37	<b>3</b>
3	82	<b>4</b>
4	69	<b>4</b>
5	98	<b>5</b>
6	96	<b>5</b>
7	33	<b>2</b>
8	50	<b>3</b>
9	88	<b>5</b>
10	90	<b>5</b>

Demanda de llantas	Intervalo de números aleatorios
0	00 – 05
1	05 – 15
2	15 – 35
3	35 – 65
4	65 – 85
5	85 – 99

## Ejemplo 2: Solución

---

### Demanda diaria promedio simulada

$$\text{Demanda diaria promedio} = \frac{\text{demanda diaria total}}{\text{número de días}} = \frac{39}{10} = \mathbf{3.9 \text{ llantas}}$$

### Demanda esperada diaria

$$\text{Demanda esperada diaria} = \sum_{i=0}^n p(x_i)x_i$$

$$\text{Demanda esperada diaria} = (0.05)(0) + (0.10)(1) + (0.20)(2) + (0.30)(3) \\ + (0.20)(4) + (0.15)(5)$$

$$\text{Demanda esperada diaria} = \mathbf{2.95 \text{ llantas}}$$

Si esta simulación se repite cientos o miles de veces, es más probable que la demanda simulada **promedio** sea casi la misma que la demanda **esperada**.

## Ejemplo 3

- Un propietario y director general de una ferretería, quiere encontrar una política de inventarios buena y de bajo costo para un producto en particular: el taladro eléctrico modelo Ace. El director le gustaría simular la política de inventario en donde una cantidad de pedido de 10 con un punto de reorden de 5 para un tiempo de simulación de 10 días. Utilice los números de la segunda columna de números aleatorios
- Se cuenta con la siguiente información

### Demanda diaria del taladro Ace

Demanda diaria de taladro	Días
0	15
1	30
2	60
3	120
4	45
5	30

### Tiempo de entrega

Tiempo de entrega (días)	Pedidos
1	10
2	25
3	15

## Ejemplo 3: Tabla de números aleatorios

---

52	06	50	88	53	30	10	47	99	37	66	91	35	32	00	84	57	07
37	63	28	02	74	35	24	03	29	60	74	85	90	73	59	55	17	60
82	57	68	28	05	94	03	11	27	79	90	87	92	41	09	25	36	77
69	02	36	49	71	99	32	10	75	21	95	90	94	38	97	71	72	49
98	94	90	36	06	78	23	67	89	85	29	21	25	73	69	34	85	76
96	52	62	87	49	56	59	23	78	71	72	90	57	01	98	57	31	95
33	69	27	21	11	60	95	89	68	48	17	89	34	09	93	50	44	51
50	33	50	95	13	44	34	62	64	39	55	29	30	64	49	44	30	16
88	32	18	50	62	57	34	56	62	31	15	40	90	34	51	95	26	14
90	30	36	24	69	82	51	74	30	35	36	85	01	55	92	64	09	85
50	48	61	18	85	23	08	54	17	12	80	69	24	84	92	16	49	59
27	88	21	62	69	64	48	31	12	73	02	68	00	16	16	46	13	85
45	14	46	32	13	49	66	62	74	41	86	98	92	98	84	54	33	40
81	02	01	78	82	74	97	37	45	31	94	99	42	49	27	64	89	42
66	83	14	74	27	76	03	33	11	97	59	81	72	00	64	61	13	52
74	05	81	82	93	09	96	33	52	78	13	06	28	30	94	23	37	39
30	34	87	01	74	11	46	82	59	94	25	34	32	23	17	01	58	73
59	55	72	33	62	13	74	68	22	44	42	09	32	46	71	79	45	89
67	09	80	98	99	25	77	50	03	32	36	63	65	75	94	19	95	88
60	77	46	63	71	69	44	22	03	85	14	48	69	13	30	50	33	24
60	08	19	29	36	72	30	27	50	64	85	72	75	29	87	05	75	01
80	45	86	99	02	34	87	08	86	84	49	76	24	08	01	86	29	11
53	84	49	63	26	65	72	84	85	63	26	02	75	26	92	62	40	67
69	84	12	94	51	36	17	02	15	29	16	52	56	43	26	22	08	62
37	77	13	10	02	18	31	19	32	85	31	94	81	43	31	58	33	51

## Ejemplo 3: Solución

### 1. Identificar tipos de variables

- Cantidad de pedido y los puntos de reorden. (variables controlables)
- Demanda diaria y el tiempo de entrega variable. (variables incontrolables)

### 2. Convertir la frecuencia de datos históricos en distribuciones de probabilidad y distribuciones de probabilidad acumulada y delimitar los intervalos para los números aleatorios

Demanda diaria de taladro	Días	Probabilidad de ocurrencia	Probabilidad acumulada
0	15	0.05	0.05
1	30	0.10	0.15
2	60	0.20	0.35
3	120	0.40	0.75
4	45	0.15	0.90
5	30	0.10	1.00

300

Tiempo de entrega (días)	Pedidos (unidades)	Probabilidad de ocurrencia	Probabilidad acumulada
1	10	0.2	0.2
2	25	0.5	0.7
3	15	0.3	1

50

## Ejemplo 3: Solución

---

### 3. Especificar valores de las variables a probar

- La primera política de inventarios de la ferretería quiere simular es una cantidad de pedido de 10 unidades con un punto de reorden de 5 unidades . Es decir, cada vez que el nivel de inventario disponible al final del día sea de 5 o menos, la ferretería llamará a su proveedor y realizara un pedido de 10 taladros más.
- Si el tiempo de entrega es de un día, el pedido no llegara a la mañana siguiente, sino al inicio del siguiente día laborable.
- Se tiene un inventario inicial de 10 unidades
- Tiempo de simulación = 10 días

## Ejemplo 3: Solución

---

### 4. Proceso de simulación

Utilizando la tabla de números aleatorios, la simulación se realiza utilizando un proceso de cuatro pasos:

- Comenzar cada día verificando si acaba de llegar algún inventario ordenado. Si es así, aumentar el inventario actual en la cantidad de la orden.
- Generar una demanda diaria a partir de la distribución de probabilidad de la demanda, seleccionando un número aleatorio.
- Calcular el inventario final cada día. Si el inventario disponible es insuficiente para cumplir la demanda del día, satisfacer lo más posible y anotar el número de ventas perdidas.
- Determinar si el inventario al final del día ha llegado al punto de reorden. Si es necesario, colocar la orden.

## Ejemplo 3: Solución

### Primera simulación del inventario de la Ferretería

Dia	Unidades Recibidas	Inv. Inicial	R numero	Demanda	Inv. final	Desabasto	Pedido	R numero	Tiempo de entrega
1	0	10	6	1	9	0	NO		0
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									

## Ejemplo 3: Solución

### Primera simulación del inventario de la Ferretería

Dia	Unidades Recibidas	Inv. Inicial	R numero	Demanda	Inv. final	Desabasto	Pedido	R numero	Tiempo de entrega
1	0	10	6	1	9	0	NO		0
2		9	63	3	6	0	NO		0
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									

## Ejemplo 3: Solución

### Primera simulación del inventario de la Ferretería

Dia	Unidades Recibidas	Inv. Inicial	R numero	Demanda	Inv. final	Desabasto	Pedido	R numero	Tiempo de entrega
1	0	10	6	1	9	0	NO		0
2		9	63	3	6	0	NO		0
3		6	57	3	3	0	SI	2	1
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									

## Ejemplo 3: Solución

### Primera simulación del inventario de la Ferretería

Dia	Unidades Recibidas	Inv. Inicial	R numero	Demanda	Inv. final	Desabasto	Pedido	R numero	Tiempo de entrega
1	0	10	6	1	9	0	NO		0
2		9	63	3	6	0	NO		0
3		6	57	3	3	0	SI	2	1
4		3	94	5	0	2	NO		2
5									
6									
7									
8									
9									
10									

## Ejemplo 3: Solución

### Primera simulación del inventario de la Ferretería

Dia	Unidades Recibidas	Inv. Inicial	R numero	Demanda	Inv. final	Desabasto	Pedido	R numero	Tiempo de entrega
1	0	10	6	1	9	0	NO		0
2		9	63	3	6	0	NO		0
3		6	57	3	3	0	SI	2	1
4		3	94	5	0	2	NO		2
5	10	10	52	3	7	0	NO		0
6									
7									
8									
9									
10									

## Ejemplo 3: Solución

### Primera simulación del inventario de la Ferretería

Dia	Unidades Recibidas	Inv. Inicial	R numero	Demanda	Inv. final	Desabasto	Pedido	R numero	Tiempo de entrega
1	0	10	6	1	9	0	NO		0
2		9	63	3	6	0	NO		0
3		6	57	3	3 <sup>a</sup>	0	SI	2 <sup>b</sup>	1
4		3	94 <sup>c</sup>	5	0	2	NO <sup>d</sup>		0
5	10 <sup>e</sup>	10	52	3	7	0	NO		0
6		7	69	3	4	0	SI	33	2
7		4	32	2	2	0	NO		0
8		2	30	2	0	0	NO		0
9	10 <sup>f</sup>	10	48	3	7	0	NO		0
10		7	88	4	3	0	SI	14	1

## Ejemplo 3: Solución

---

- a. Esta es la primera vez que el inventario cae por debajo del punto de reorden de 5 taladros. Debido a que no se realizó ningún pedido previo, se coloca una orden
- b. Se genera el número aleatorio 02 para representar el primer tiempo de entrega. Se extrae de la columna 2 de la tabla como el próximo de la lista a utilizar. Se podría haber usado una columna por separado para extraer números aleatorios del tiempo de entrega, de haberlo deseado así.
- c. Se utilizó el número aleatorio 02 para el tiempo de entrega. Así que el siguiente número de la columna es 94
- d. No se realiza ningún pedido en el día 4 porque hay una orden del día anterior que aún no ha llegado.
- e. El tiempo de entrega para el primer pedido es de un día, pero como se ha señalado, una orden no llega a la mañana siguiente, sino hasta el inicio del siguiente día laborable. Por lo tanto, el primer pedido llega al inicio del día 5
- f. Esta es la llegada del pedido realizado en el cierre de operaciones del día 6.

## Ejemplo 3: Análisis de costos

---

### Análisis de costos

- El objetivo es encontrar una solución de bajo costo, y determinar cuáles los costos .
- Se deben calcular indicadores para el análisis.

$$\text{Inventario final promedio} = \frac{\text{Inventario total}}{\text{Tiempo de simulación}} = \frac{41 \text{ unidades}}{10 \text{ días}} = 4.1 \text{ unidades por día}$$

$$\text{Desabasto promedio} = \frac{\text{Desabasto total}}{\text{Tiempo de simulación}} = \frac{2 \text{ unid ventas perdidas}}{10 \text{ días}} = 0.2 \text{ undiades por dia}$$

$$\text{Promedio de órdenes} = \frac{\text{Total de órdenes colocadas}}{\text{Tiempo de simulación}} = \frac{3 \text{ órdenes}}{10 \text{ días}} = 0.3 \text{ pedidos por día}$$

## Ejemplo 3: Análisis de costos

---

- La ferretería está abierta 200 días al año. Se estima que el costo de colocar cada pedido es de \$10. El costo por mantener en almacén es \$6 por unidad al año, que también puede ser visto como 3 centavos por unidad por día (para un año de 200 días). Por último, se estima que el costo de cada escasez o venta perdida es de \$8. ¿Cuál es el costo total del inventario diario total para la política de inventario con una cantidad de pedido de 10 unidades y un punto de reorden de 5.

*Costo diario por ordenar = (costo de colocar una orden) × (número de órdenes colocadas por día)*

*Costo diario por ordenar = \$10 por orden × 0.3 órdenes por día*

*Costo diario por ordenar = \$3*

*Costo diario por mantener = (costo por mantener una unidad por día) × (inventario final promedio)*

*Costo diario por ordenar = \$0.03 por unidad por día × 4.1 unidades por día*

*Costo diario por ordenar = \$0.12*

## Ejemplo 3: Análisis de costos

---

*Costo de desabasto diario = (costo por venta perdida) × (número de ventas perdidas por día)*

*Costo de desabasto diario = \$8 por venta perdida × 0.2 ventas perdidas por día*

*Costo de desabasto diario = \$1.60*

*Costo del inventario diario total = costo por pedido + costo por almacenamiento + costo por desabasto*

*Costo del inventario diario total = \$3.00 + \$0.12 + \$1.60*

*Costo del inventario diario total = \$4.72*

## Ejemplo 3: Análisis de costos

---

- Para el año, esta política costaría aproximadamente \$944.
- Esta simulación realmente debería extenderse por muchos días más, tal vez 100 o 1,000 días.
- Incluso después de una simulación más grande, el modelo debe ser verificado y validado para asegurarse de que realmente representa la situación en la que se basa.
- Si estamos satisfechos con el modelo, se pueden realizar simulaciones adicionales utilizando otros valores para las variables.
- Después de simular todas las combinaciones razonables, la ferretería seleccionaría la política que dé como resultado el menor costo total.

## Ejemplo 4

---

Por la noche, llegan a un puerto barcazas totalmente cargadas después de largos viajes por el río desde ciudades del medio oeste industrial. El número de barcazas que atracan en una noche cualquiera va de 0 a 5. Las probabilidades de 0, 1, 2, 3, 4 o 5 llegadas se muestra en la table. En la misma table, se establecen probabilidades acumuladas y los intervalos de números aleatorios correspondientes.

Un estudio realizado por el superintendente del muelle revela que debido a la naturaleza de su carga, el número de barcazas descargadas también suele variar de un día a otro. El superintendente proporciona información de la que se puede crear una distribución de probabilidad para la variable llamada tasa de descarga diaria.

Las barcazas se descargan con una base del primero en llegar, el primero en salir. Cualquier barcaza que no sea descargada al día de su llegada tendrá que esperar hasta el día siguiente. Atar una barcaza en el muelle es una propuesyas costosa, y el superintendente no puede ignorar las llamadas telefónicas de propietarios molestos en la línea de barcazas. Decide que antes de ir con el controlador del Puerto para solicitar cuadrillas de descarga adicionales, debe realizar un estudio de simulación de las llegadas, las descargas y los retrasos. Una simulación de 100 días sería ideal; pero con fines de ilustración, el superintendente comienza con un análisis más corto de 15 días. Se extraen números aleatorios de la fila superior para generar las tasas de llegada y de la segunda fila para crear las tasas de descarga diaria.

## Ejemplo 4: Tasas de llegadas de barcazas por la noche e intervalos de números aleatorios

---

Nr de llegadas	Probabilidad	Prob. acumulada	Intervalos de R
0	0.13	0.13	0 – 12
1	0.17	0.3	13 – 29
2	0.15	0.45	30 – 44
3	0.25	0.7	45 – 69
4	0.2	0.9	70 – 89
5	0.1	1	90 - 99

## Ejemplo 4: Tasas de descargas e intervalos de números aleatorios

---

Nr de descargas	Probabilidad	Prob. acumulada	Intervalos de R
1	0.05	0.05	0 – 4
2	0.15	0.2	5 – 19
3	0.5	0.7	20 – 69
4	0.2	0.9	70 – 89
5	0.1	1	90 – 99

## Ejemplo 4: Tabla de números aleatorios

---

Números aleatorios  
para la tasa de llegada

Números aleatorios para  
la tasa de descarga

52	06	50	88	53	30	10	47	99	37	66	91	35	32	00	84	57	07
37	63	28	02	74	35	24	03	29	60	74	85	90	73	59	55	17	60
82	57	68	28	05	94	03	11	27	79	90	87	92	41	09	25	36	77
69	02	36	49	71	99	32	10	75	21	95	90	94	38	97	71	72	49
98	94	90	36	06	78	23	67	89	85	29	21	25	73	69	34	85	76
96	52	62	87	49	56	59	23	78	71	72	90	57	01	98	57	31	95
33	69	27	21	11	60	95	89	68	48	17	89	34	09	93	50	44	51
50	33	50	95	13	44	34	62	64	39	55	29	30	64	49	44	30	16

## Ejemplo 4: Solución

Día	Número de retrasos del día anterior	Número R	Número de llegadas nocturnas	Total a descargar	Número R	Número de descargas posibles	Descargados
1	0	52	3	3	37	3	3
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							

## Ejemplo 4: Solución

Día	Número de retrasos del día anterior	Número R	Número de llegadas nocturnas	Total a descargar	Número R	Número de descargas posibles	Descargados
1	0	52	3	3	37	3	3
2	0	6	0	0	63	3	0
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							

## Ejemplo 4: Solución

Día	Número de retrasos del día anterior	Número R	Número de llegadas nocturnas	Total a descargar	Número R	Número de descargas posibles	Descargados
1	0	52	3	3	37	3	3
2	0	6	0	0	63	3	0
3	0	50	3	3	28	3	3
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							

## Ejemplo 4: Solución

Día	Número de retrasos del día anterior	Número R	Número de llegadas nocturnas	Total a descargar	Número R	Número de descargas posibles	Descargados
1	0	52	3	3	37	3	3
2	0	6	0	0	63	3	0
3	0	50	3	3	28	3	3
4	0	88	4	4	2	1	1
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							

## Ejemplo 4: Solución

Día	Número de retrasos del día anterior	Número R	Número de llegadas nocturnas	Total a descargar	Número R	Número de descargas posibles	Descargados
1	0	52	3	3	37	3	3
2	0	6	0	0	63	3	0
3	0	50	3	3	28	3	3
4	0	88	4	4	2	1	1
5	3	53	3	6	74	4	4
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							

## Ejemplo 4: Solución

Día	Número de retrasos del día anterior	Número R	Número de llegadas nocturnas	Total a descargar	Número R	Número de descargas posibles	Descargados
1	0	52	3	3	37	3	3
2	0	6	0	0	63	3	0
3	0	50	3	3	28	3	3
4	0	88	4	4	2	1	1
5	3	53	3	6	74	4	4
6	2	30	2	4	35	3	3
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							

## Ejemplo 4: Solución

Día	Número de retrasos del día anterior	Número R	Número de llegadas nocturnas	Total a descargar	Número R	Número de descargas posibles	Descargados
1	0	52	3	3	37	3	3
2	0	6	0	0	63	3	0
3	0	50	3	3	28	3	3
4	0	88	4	4	2	1	1
5	3	53	3	6	74	4	4
6	2	30	2	4	35	3	3
7	1	10	0	1	24	3	1
8	0	47	3	3	3	1	1
9	2	99	5	7	29	3	3
10	4	37	2	6	60	3	3
11	3	66	3	6	74	4	4
12	2	91	5	7	85	4	4
13	3	35	2	5	90	5	5
14	0	32	2	2	73	4	2
15	0	0	0	0	59	3	0

## Ejemplo 4: Solución

---

$$\text{Número promedio de barcazas retrasadas para el día siguiente} = \frac{20 \text{ retrasos}}{15 \text{ días}} = 1.33$$

$$\text{Número promedio de llegadas nocturnas} = \frac{37 \text{ llegadas}}{15 \text{ días}} = 2.47$$

$$\text{Número promedio de barcazas descargadas cada día} = \frac{37 \text{ descargas}}{15 \text{ días}} = 2.47$$

## Ejemplo 5: Modelo de simulación para una política de mantenimiento

---

La compañía de suministro de energía Three Hills Power ofrece electricidad a una área metropolitana grande mediante una serie de casi 200 generadores hidroeléctricos.

La compañía está preocupada por las fallas del generador porque una descompostura cuesta alrededor de \$75 por generador por hora.

Sus cuatro reparadores ganan \$30 por hora y trabajan rotando turnos de 8 horas.

La administración desea evaluar la:

1. El costo del servicio de mantenimiento
2. El costo simulado de la descompostura de la máquina
3. Los costos totales

Hay dos componentes importantes del sistema de mantenimiento:

- Tiempo entre averías sucesivas del generador que varía de 30 minutos a tres horas.
- El tiempo que toma reparar los generadores que va de una a tres horas en bloques de una hora

Se desea efectuar una simulación de 15 fallas.

## Ejemplo 5: Modelo de simulación para una política de mantenimiento

Se ejecuta la simulación seleccionando una serie de números aleatorios para generar tiempos simulados entre averías de generador (penúltima columna) y una segunda serie para simular los tiempos de reparación necesarios (ultima columna)

Números aleatorios para tiempos de reparación

52	06	50	88	53	30	10	47	99	37	66	91	35	32	00	84	57	07
37	63	28	02	74	35	24	03	29	60	74	85	90	73	59	55	17	60
82	57	68	28	05	94	03	11	27	79	90	87	92	41	09	25	36	77
69	02	36	49	71	99	32	10	75	21	95	90	94	38	97	71	72	49
98	94	90	36	06	78	23	67	89	85	29	21	25	73	69	34	85	76
96	52	62	87	49	56	59	23	78	71	72	90	57	01	98	57	31	95
33	69	27	21	11	60	95	89	68	48	17	89	34	09	93	50	44	51
50	33	50	95	13	44	34	62	64	39	55	29	30	64	49	44	30	16

Números aleatorios para tiempos entre averías de máquinas

## Ejemplo 5: Tiempo entre fallas de máquinas registradas

---

Tiempo entre fallas (horas)	Número de observaciones	Prob. de ocurrencia	Prob. acumulada	Intervalos R
0.5	5	0.05	0.05	0 – 4
1	6	0.06	0.11	5 – 10
1.5	16	0.16	0.27	11 – 26
2	33	0.33	0.6	27 – 59
2.5	21	0.21	0.81	60 – 80
3	19	0.19	1	81 – 99

## Ejemplo 5: Tiempos requeridos para la reparación

---

Tiempo de reparación (horas)	Número de observaciones	Prob. de ocurrencia	Prob. acumulada	Intervalos R
1	28	0.28	0.28	0 – 27
2	52	0.52	0.8	28 – 79
3	20	0.2	1	80 – 99

## Ejemplo 5: Solución

Número de fallas	Número R	Tiempo entre fallas	Hora de la falla	Hora en que el reparador está libre para empezar esta reparación	Número R	Tiempo de reparación requerido	Hora de finalización de reparación	Número de horas en que la máquina está descompuesta
1	57	2:00	2:00 AM	2:00 AM	7	1:00	3:00 AM	1:00
2	17				60			
3	36				77			
4	72				49			
5	85				76			
6	31				95			
7	44				51			
8	30				16			
9	26				14			
10	9				85			
11	49				59			
12	13				85			
13	33				40			
14	89				42			
15	13				52			

## Ejemplo 5: Solución

Número de fallas	Número R	Tiempo entre fallas	Hora de la falla	Hora en que el reparador está libre para empezar esta reparación	Número R	Tiempo de reparación requerido	Hora de finalización de reparación	Número de horas en que la máquina está descompuesta
1	57	2:00	2:00 AM	2:00 AM	7	1:00	3:00 AM	1:00
2	17	1:30	3:30 AM	3:30 AM	60	2:00	5:30 AM	2:00
3	36				77			
4	72				49			
5	85				76			
6	31				95			
7	44				51			
8	30				16			
9	26				14			
10	9				85			
11	49				59			
12	13				85			
13	33				40			
14	89				42			
15	13				52			

## Ejemplo 5: Solución

Número de fallas	Número R	Tiempo entre fallas	Hora de la falla	Hora en que el reparador está libre para empezar esta reparación	Número R	Tiempo de reparación requerido	Hora de finalización de reparación	Número de horas en que la máquina está descompuesta
1	57	2:00	2:00 AM	2:00 AM	7	1:00	3:00 AM	1:00
2	17	1:30	3:30 AM	3:30 AM	60	2:00	5:30 AM	2:00
3	36	2:00	5:30 AM	5:30 AM	77	2:00	7:30 AM	2:00
4	72				49			
5	85				76			
6	31				95			
7	44				51			
8	30				16			
9	26				14			
10	9				85			
11	49				59			
12	13				85			
13	33				40			
14	89				42			
15	13				52			

## Ejemplo 5: Solución

Número de fallas	Número R	Tiempo entre fallas	Hora de la falla	Hora en que el reparador está libre para empezar esta reparación	Número R	Tiempo de reparación requerido	Hora de finalización de reparación	Número de horas en que la máquina está descompuesta
1	57	2:00	2:00 AM	2:00 AM	7	1:00	3:00 AM	1:00
2	17	1:30	3:30 AM	3:30 AM	60	2:00	5:30 AM	2:00
3	36	2:00	5:30 AM	5:30 AM	77	2:00	7:30 AM	2:00
4	72	2:30	8:00 AM	8:00 AM	49	2:00	10:00 AM	2:00
5	85	3:00	11:00 AM	11:00 AM	76	2:00	1:00 PM	2:00
6	31	2:00	1:00 PM	1:00 PM	95	3:00	4:00 PM	3:00
7	44	2:00	3:00 PM	4:00 PM	51	2:00	6:00 PM	3:00
8	30	2:00	5:00 PM	6:00 PM	16	1:00	7:00 PM	2:00
9	26	1:30	6:30 PM	7:00 PM	14	1:00	8:00 PM	1:30
10	9	1:00	7:30 PM	8:00 PM	85	3:00	11:00 PM	3:30
11	49	2:00	9:30 PM	11:00 PM	59	2:00	1:00 AM	3:30
12	13	1:30	11:00 PM	1:00 AM	85	3:00	4:00 AM	5:00
13	33	2:00	1:00 AM	4:00 AM	40	2:00	6:00 AM	5:00
14	89	3:00	4:00 AM	6:00 AM	42	2:00	8:00 AM	4:00
15	13	1:30	5:30 AM	8:00 AM	52	2:00	10:00 AM	4:30

## Ejemplo 5: Solución

---

Total de horas que los generadores están fuera de servicio: 44

Total de horas de servicio del trabajador (desde las 2:00 am hasta las 10 am del día siguiente) : 32 horas

Costo de mano de obra: \$30/hora

Costo por inactividad de máquina: \$75/hora

*Costo del servicio de mantenimiento = 32 horas de mano de obra × \$ 30 por hora de mano de obra*

*Costo del servicio de mantenimiento = \$960*

*Costo de máquina averiada = 44 horas totales de avería × \$ 75 perdidos por hora inactiva*

*Costo de máquina averiada = \$3,300*

*Costo total de mantenimiento = \$960 + \$3,300*

*Costo total de mantenimiento = \$4,260*

# Bibliografía

---

- Cassandras & Lafortune. (2008). *Introduction to Discrete Event Systems*. Springer
- García et al. (2013). *Simulación y Análisis de Sistemas con ProModel*. Editorial Pearson.
- Render, B. (2016). *Métodos cuantitativos para los Negocios*. Editorial Pearson.
- Taha, H. (2011). *Investigación de Operaciones*. Editorial Pearson.
- Schroeder et al. (2011). *Administración de Operaciones*. McGraw-Hill
- Render, B. & Heizer, J. (2014). *Principios de Administración de Operaciones*. Pearson
- Chase, R. & Jacobs, F. (2014). *Administración de Operaciones, Producción y Cadena de Suministro*. McGraw – Hill
- Hillier, F. & Lieberman, G. (2015). *Investigación de Operaciones*. McGraw-Hill
- Anderson, D. & Sweeny, D. (2019). *Métodos Cuantitativos para los Negocios*. Cengage
- Nahmias, S. (2007). *Análisis de la Producción y las Operaciones*. McGraw-Hill
- Rees, M. (2015). *Business Risk and Simulation Modeling in Practice*. John Wiley & Sons Ltd
- Serman, J. (2000). *Business Dynamics – Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill
- Winston, W. (2017) *Microsoft Excel 2016 – Data Analysis and Business Modeling*. Microsoft press
- Slack, N., et al. (2016) . *Operations Management*. Pearson
- Stevenson, W. (2015). *Operations Management*. McGraw-Hill
- Alvarez, H. (2011). *Introducción a la Simulación*. Universidad Tecnológica de Panamá



Ricardo Caballero, M.Sc.

Docente Tiempo Completo  
Facultad de Ingeniería Industrial  
Centro Regional de Chiriquí  
Universidad Tecnológica de Panamá

E-mail: [ricardo.caballero@utp.ac.pa](mailto:ricardo.caballero@utp.ac.pa)

<https://www.academia.utp.ac.pa/ricardo-caballero>