



# Pulp and Paper Business Logistics

---

## Entrega 2: modelo Conceptual y computacional

### **Alumnos:**

Ignacio Acevedo  
Ignacio Barría  
Daniel Carrasco  
Kevin Johnson

**Fecha Entrega:** 17 de abril del 2017



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y SISTEMAS  
ICS3723 – SIMULACIÓN

## **Resumen ejecutivo**

En esta entrega, en el contexto del concurso de simulación de SIMIO titulado “*Pulp and Paper Business Logistics*”, se presentan tanto las bases conceptuales de la modelación como el desarrollo del modelo computacional y sus primeros resultados.

En primer lugar, respecto a las bases conceptuales, se consideraron las sugerencias recibidas en la primera entrega y se aplicaron en este informe, por lo que se definieron clara y específicamente las entidades que fluyen en el sistema, los recursos y capacidades, la política de operación (detallada), los límites del modelo, los supuestos, las variables aleatorias, los eventos y los aspectos a estudiar.

En segundo lugar, se indica el detalle de la modelación computacional en el programa SIMIO, mostrándose el esquema general de la modelación, las principales variables y procesos utilizados, y los “experimentos” diseñados para extraer resultados.

En tercer lugar, con el modelo computacional ya ejecutado se extrajeron los primeros resultados, de los cuales se presenta un primer análisis que guiará la definición de la política a implementar en el modelo mejorado.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y SISTEMAS  
ICS3723 – SIMULACIÓN

## Índice

1. Introducción	9
2. Modelo conceptual	9
2.1. Contextualización	9
2.2. Entidades que fluyen por el sistema	9
2.3. Recursos y capacidades	10
2.4. Política de operación	10
2.5. Límites del modelo	16
2.6. Supuestos	16
2.7. Variables aleatorias de INPUT y de OUTPUT	18
2.8. Eventos	18
2.9. Aspectos a estudiar	19
3. Modelo computacional	19
3.1. Descripción general	19
3.2. Contexto	20
3.3. Caminos	21
3.4. Madera	21
3.5. Aserraderos	21
3.6. Papeleras	23
3.7. Camiones	25
3.8. Demanda	25



3.9. Stock outs	26
4. Resultados de la simulación	26
4.1. Costo de transporte	27
4.2. Inventario promedio	28
4.3. Costo total de inventario	31
4.4. Gastos por penalización debido a inventario bajo	31
4.5. Días perdidos respecto al mal tiempo	35
4.6. Número de stockouts	36
4.7. Cantidad máxima de madera talada en los territorios	37
4.8. Cantidad promedio de madera cortada por aserradero	38
4.9. Tiempo de espera promedio en cada scalehouse	39
4.10. Cantidad de reparaciones de grúa en cada año	42
4.11. Días de producción perdidos debido a stockouts	43
5. Conclusión	46
5.1. Razonabilidad del modelo conceptual y computacional	46
5.2. Principales resultados	46
5.3. Posibles nuevas políticas de operación	47
6. Bibliografía	48
7. Anexos	49



## Índice de ilustraciones

Ilustración 1: vista de una planta de procesamiento	12
Ilustración 2: distribución espacial de los aserraderos y las papeleras, indexados por los números de 1 a 100	14
Ilustración 3: asignación aserraderos-plantas	15
Ilustración 4: distribución espacial de los caminos (en rojo)	15
Ilustración 5: vista general del entorno gráfico de la simulación	20
Ilustración 6: vista de un aserradero en la simulación	22
Ilustración 7: vista de una papelera en la simulación	23
Ilustración 8: resultados de las réplicas para la simulación en costo total de transporte	27
Ilustración 9: resultados de las réplicas para la simulación en inventario promedio en Koala	28
Ilustración 10: resultados de las réplicas para la simulación en inventario promedio en PaperTech	29
Ilustración 11: resultados de las réplicas para la simulación en inventario promedio en Bright	30
Ilustración 12: resultados de las réplicas para la simulación en costo total de inventario	31
Ilustración 13: resultados de las réplicas para la simulación en gasto en multas por inventario bajo en Koala	32
Ilustración 14: resultados de las réplicas para la simulación en gasto en multas por inventario bajo en PaperTech	33



Ilustración 15: resultados de las réplicas para la simulación en gasto en multas por inventario bajo para Bright	34
Ilustración 16: resultados de las réplicas para la simulación en días perdidos por mal tiempo	35
Ilustración 17: resultados de las réplicas para la simulación en número de stockouts	36
Ilustración 18: resultados de las réplicas para la simulación en cantidad máxima de madera talada en los territorios	37
Ilustración 19: resultados de las réplicas para la simulación en cantidad promedio talada en los aserraderos	38
Ilustración 20: resultados de las réplicas para la simulación en tiempo de espera promedio en scalehouse de entrada de Koala	39
Ilustración 21: resultados de las réplicas para la simulación en tiempo de espera promedio en scalehouse de entrada de PaperTech	40
Ilustración 22: resultados de las réplicas para la simulación en tiempo de espera promedio en scalehouse de entrada de Bright	41
Ilustración 23: resultados de las réplicas para la simulación en número de reparaciones de grúa	42
Ilustración 24: resultados de las réplicas para la simulación en días de producción perdidos por stockout en Koala	43
Ilustración 25: resultados de las réplicas para la simulación en días de producción perdidos por stockout en PaperTech	44
Ilustración 26: resultados de las réplicas para la simulación en días de producción perdidos por stockout en Bright	45



## Índice de tablas

Tabla 1: días de reparación y descanso	11
Tabla 2: distribución de camiones que salen de un aserradero	17
Tabla 3: resultados de las réplicas para la simulación en costo total de transporte	27
Tabla 4: resultados de las réplicas para la simulación en inventario promedio en Koala	28
Tabla 5: resultados de las réplicas para la simulación en inventario promedio en PaperTech	29
Tabla 6: resultados de las réplicas para la simulación en inventario promedio en Bright	30
Tabla 7: resultados de las réplicas para la simulación en costo total de inventario	31
Tabla 8: resultados de las réplicas para la simulación en gasto en multas por inventario bajo en Koala	32
Tabla 9: resultados de las réplicas para la simulación en gasto en multas por inventario bajo en PaperTech	33
Tabla 10: resultados de las réplicas para la simulación en gasto en multas por inventario bajo para Bright	34
Tabla 11: resultados de las réplicas para la simulación en días perdidos por mal tiempo	35



Tabla 12: resultados de las réplicas para la simulación en número de stockouts	36
Tabla 13: resultados de las réplicas para la simulación en cantidad máxima de madera talada en los territorios	37
Tabla 14: resultados de las réplicas para la simulación en cantidad promedio talada en los aserraderos	38
Tabla 15: resultados de las réplicas para la simulación en tiempo de espera promedio en scalehouse de entrada de Koala	39
Tabla 16: resultados de las réplicas para la simulación en tiempo de espera promedio en scalehouse de entrada de PaperTech	40
Tabla 17: resultados de las réplicas para la simulación en tiempo de espera promedio en scalehouse de entrada de Bright	41
Tabla 18: resultados de las réplicas para la simulación en número de reparaciones de grúa	42
Tabla 19: resultados de las réplicas para la simulación en días de producción perdidos por stockout en Koala	43
Tabla 20: resultados de las réplicas para la simulación en días de producción perdidos por stockout en PaperTech	44
Tabla 21: resultados de las réplicas para la simulación en días de producción perdidos por stockout en Bright	45
Tabla 22: principales resultados	46





## Anexos

Anexo 1: Código en Python para elegir al azar 1 o 2 días libres para cada aserradero (L.O.)	49
Anexo 2: Archivo de texto generado por el código del anexo 1	49
Anexo 3: Código en Python para asignar a cada aserradero un molino al azar	50
Anexo 4: Archivo de texto generado por el código de la figura 6	50
Anexo 5: cantidad de camiones que tiene cada aserradero	51
Anexo 6: proceso de creación de camiones y carga	51
Anexo 7: proceso de gestión de stockouts	52
Anexo 8: proceso de gestión de demanda	52



## **1. Introducción**

En el presente informe se presentarán las bases conceptuales, el modelo computacional y los principales resultados de la simulación para el concurso de simulación de SIMIO, titulado “Pulp and Paper Business Logistics”.

Primero se analizarán y explicarán las entidades que fluyen en el sistema, las capacidades y los recursos involucrados, las políticas de operación, los límites del modelo, los supuestos, las variables aleatorias de INPUT y de OUTPUT, y los eventos.

Luego se describirá cómo se elaboró el modelo computacional en SIMIO, para lo que se agrupará la información entorno a tópicos como la región, caminos, papeleras y aserraderos.

Posteriormente se plantean los principales resultados pedidos por la organización de simio, para dar lugar, posteriormente, a las conclusiones.

## **2. Modelo conceptual**

### **2.1. Contextualización**

Se pretende que mediante un modelo de simulación (con un horizonte de simulación de dos años) se optimice coordinadamente la operación logística de los aserraderos del *midwest* estadounidense, para lo que debemos decidir qué aserradero produce para qué planta, entre otros aspectos de la política operacional.

Es importante considerar que, dada la libertad que deja la formulación del enunciado, aspectos fundamentales del negocio paplero fueron definidos por el equipo, lo que será explicado más adelante en los apartados de supuestos y políticas de operación.

### **2.2. Entidades que fluyen por el sistema**

Solamente los camiones; conforme al enunciado, estas son las entidades utilizadas para transportar la madera desde los aserraderos hasta las plantas de procesamiento. Por lo que serán las entidades que modelaremos. La madera que poseen será un parámetro de esta entidad (y de los inventarios) que será modificado en la medida que el camión sea sometido a procesos de carga y descarga (además del gasto por parte del *digester*).



### 2.3. Recursos y capacidades

1. Grúas: son entidades utilizadas para transportar y acomodar la madera en los centros de acopio de las plantas.
2. Capacidades de inventario:
  - a. *Koala Paper*: 100.000 toneladas.
  - b. *Bright*: 120.000 toneladas.
  - c. *PaperTech*: 60.000 toneladas.
3. Cantidad de grúas por planta: seis.
4. Pistas de circulación de camiones en *scale-houses*: una por sentido.
5. Cantidad de manera al comenzar la simulación:
  - a. *Koala Paper*: 60.000 toneladas.
  - b. *Bright*: 60.000 toneladas.
  - c. *PaperTech*: 55.000 toneladas.
6. Cantidad de camiones de cada aserradero: entre 4 y 6 (ver anexo 5 para más detalle).

### 2.4. Política de operación

- i. Funcionamiento de los aserraderos y sus camiones
  - a. Las horas de operación de los aserraderos corresponden a las horas de luz, la información al respecto fue extraída de [www.tutiempo.net/calendario-solar/](http://www.tutiempo.net/calendario-solar/) (se considerará la ubicación de Minneapolis, ciudad del *midwest* estadounidense en Minnesota).
  - b. En los caminos se desplazan los camiones llenos a una velocidad de 45mph cuando están cargados y a 55mph cuando no, mientras que, dentro de las plantas de procesamiento, por razones de seguridad, se desplazan a 10mph.
  - c. El costo de transportar un camión desde un aserradero hacia una planta de procesamiento es de 0,12 USD/ (tonelada milla). Se asumirá que el costo de regreso es despreciable.
  - d. La descarga de camiones en las papeleras se realiza con política FIFO.
  - e. Los aserraderos saben al inicio de la jornada laboral (cuando amanece) la cantidad máxima de camiones cargados que podrían enviar durante el día.
  - f. El aserradero tiene las cargas de madera ya disponibles para el envío cuando recibe los pedidos (sujeto a la disponibilidad de camiones y cantidad máxima que se puede enviar al día).



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
 ESCUELA DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y SISTEMAS  
 ICS3723 – SIMULACIÓN

- g. Los aserraderos envían los cargamentos desde el centro de sus instalaciones.
- h. Los aserraderos reforestan plantando un árbol en la misma ubicación donde talan.
- i. Se considerará que los aserraderos dejan días para el mantenimiento de los equipos y descanso de acuerdo a la Tabla 1.

Aserradero 1	Aserradero 2	Aserradero 3	Aserradero 4	Aserradero 5	Aserradero 6	Aserradero 7	Aserradero 8	Aserradero 9	Aserradero 10
Martes	Viernes	Sábado	Domingo	Miércoles	Martes	Martes	Domingo	Domingo	Domingo
	Domingo	Jueves	Miércoles		Jueves	Lunes	Lunes	Jueves	
Aserradero 11	Aserradero 12	Aserradero 13	Aserradero 14	Aserradero 15	Aserradero 16	Aserradero 17	Aserradero 18	Aserradero 19	Aserradero 20
Domingo	Viernes	Sábado	Miércoles	Sábado	Domingo	Martes	Domingo	Domingo	Domingo
	Sábado			Miércoles	Sábado		Jueves	Jueves	Miércoles
Aserradero 21	Aserradero 22	Aserradero 23	Aserradero 24	Aserradero 25	Aserradero 26	Aserradero 27	Aserradero 28	Aserradero 29	Aserradero 30
Domingo	Domingo	Miércoles	Martes	Martes	Domingo	Jueves	Jueves	Martes	Miércoles
Miércoles	Martes	Domingo	Domingo	Domingo		Domingo	Domingo		Jueves
Aserradero 31	Aserradero 32	Aserradero 33	Aserradero 34	Aserradero 35	Aserradero 36	Aserradero 37	Aserradero 38	Aserradero 39	Aserradero 40
Jueves	Viernes	Viernes	Domingo	Jueves	Lunes	Martes	Domingo	Domingo	Domingo
Sábado		Domingo			Jueves	Domingo	Lunes	Sábado	
Aserradero 41	Aserradero 42	Aserradero 43	Aserradero 44	Aserradero 45	Aserradero 46	Aserradero 47	Aserradero 48	Aserradero 49	Aserradero 50
Jueves	Lunes	Viernes	Lunes	Martes	Jueves	Sábado	Domingo	Miércoles	Jueves
	Martes			Miércoles	Miércoles		Miércoles	Jueves	Domingo
Aserradero 51	Aserradero 52	Aserradero 53	Aserradero 54	Aserradero 55	Aserradero 56	Aserradero 57	Aserradero 58	Aserradero 59	Aserradero 60
Lunes	Domingo	Lunes	Viernes	Domingo	Domingo	Miércoles	Domingo	Domingo	Miércoles
		Domingo		Martes	Lunes		Martes	Sábado	Domingo
Aserradero 61	Aserradero 62	Aserradero 63	Aserradero 64	Aserradero 65	Aserradero 66	Aserradero 67	Aserradero 68	Aserradero 69	Aserradero 70
Domingo	Domingo	Domingo	Lunes	Domingo	Domingo	Domingo	Lunes	Domingo	Domingo
Martes		Sábado		Miércoles	Lunes				
Aserradero 71	Aserradero 72	Aserradero 73	Aserradero 74	Aserradero 75	Aserradero 76	Aserradero 77	Aserradero 78	Aserradero 79	Aserradero 80
Martes	Jueves	Miércoles	Viernes	Sábado	Sábado	Domingo	Lunes	Lunes	Domingo
	Domingo	Domingo		Domingo	Viernes			Jueves	Martes
Aserradero 81	Aserradero 82	Aserradero 83	Aserradero 84	Aserradero 85	Aserradero 86	Aserradero 87	Aserradero 88	Aserradero 89	Aserradero 90
Sábado	Lunes	Domingo	Martes	Martes	Sábado	Domingo	Sábado	Lunes	Domingo
Viernes			Jueves	Domingo	Miércoles		Domingo	Domingo	
Aserradero 91	Aserradero 92	Aserradero 93	Aserradero 94	Aserradero 95	Aserradero 96	Aserradero 97	Aserradero 98	Aserradero 99	Aserradero 100
Miércoles	Domingo	Domingo	Lunes	Domingo	Martes	Domingo	Jueves	Sábado	Domingo
			Viernes		Viernes			Miércoles	

Tabla 1: días de reparación y descanso

- ii. Funcionamiento de las papeleras
  - a. La forma de una papeleras es de acuerdo a la Ilustración 1, donde se tienen las estaciones de pesaje en la vía de ida y la de vuelta, las grúas (móviles), el centro de acopio de madera (del tamaño de 4 campos de fútbol americano) y el edificio de procesamiento (*digestor*) en la parte superior. Para efectos del modelo no se toma en cuenta la distancia extra



del *digester*, solo está en la figura para poder explicar de mejor manera. Un camión recorre la planta desde la entrada hasta donde esté el primer espacio desocupado (respecto al *digester*), lugar donde espera que una grúa lo descargue, para luego cruzar y dirigirse por la vía de retorno hasta la salida (para más claridad ver la Ilustración 1).

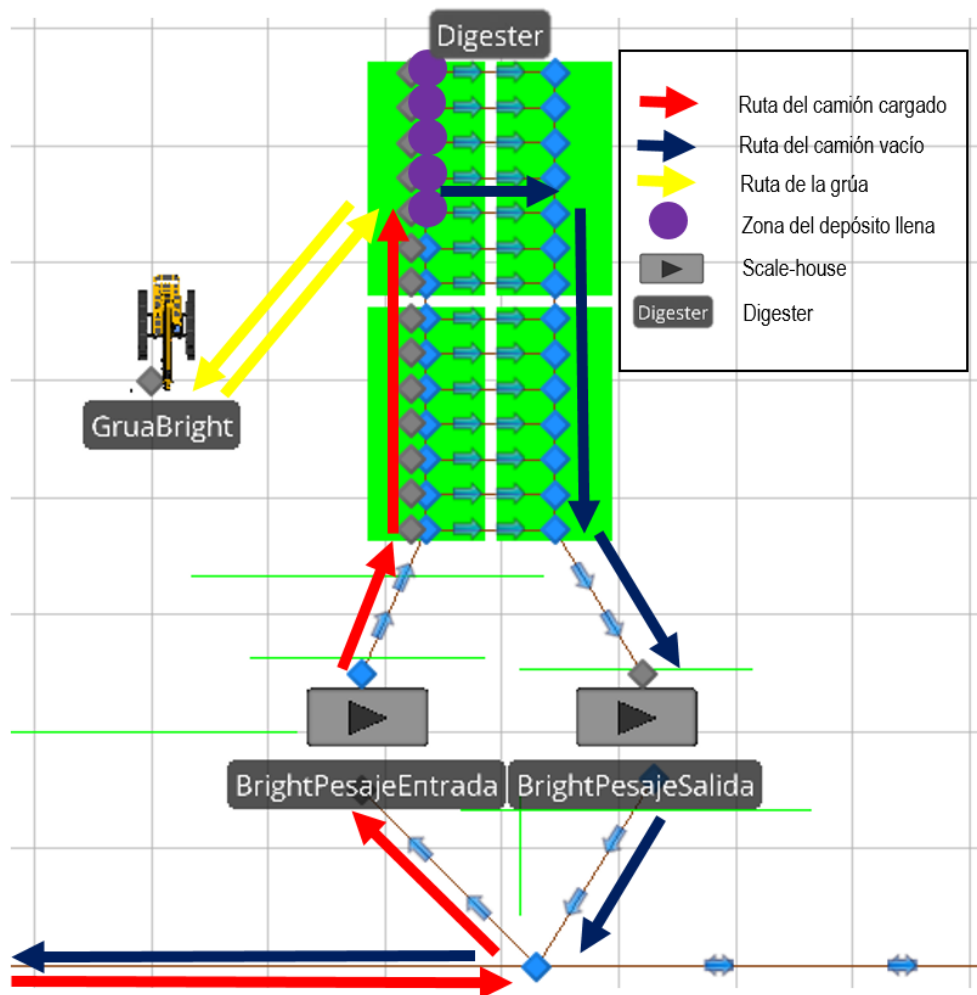


Ilustración 1: vista de una planta de procesamiento

- b. El camino que deben recorrer los camiones dentro de una planta depende del estado de saturación del depósito, donde recorren menos si está más lleno (ver Ilustración 1). El área del depósito corresponde al área de cuatro canchas de fútbol americano (distribuidas conforme a la Ilustración 1). Las



dimensiones de una cancha de fútbol americano son 110 metros de largo por 50 metros de ancho.

- c. Las papeleras funcionan todo el tiempo (política 24/7).
- d. Las papeleras saben su demanda al principio del día (00:00).
- e. Las papeleras pueden solicitar camiones cargados a los aserraderos desde que sale el Sol hasta que este pone.
- f. Las grúas se mantienen cada 250 horas de trabajo.
- g. El tiempo de pesaje de los camiones salientes es de un minuto.
- h. Una papelerera define al principio del día cuántas cargas pedirá a cada aserradero de acuerdo al siguiente mecanismo:
  - i. Define cuántas cargas solicitará dividiendo su demanda en 30 toneladas (el valor esperado de la carga de cada camión).
  - ii. Divide la cantidad de cargas homogéneamente entre el total de aserraderos asignados (división entera). El resto de las cargas son pedidas a los aserraderos más cercanos de una en una (se pide una al más cercano, luego una al siguiente más cercano, y así sucesivamente hasta completar lo necesario). La justificación de esta política es no dar tanto poder de mercado al aserradero más cercano.
  - iii. Para realizar el proceso anterior no se consideran los aserraderos que no tienen madera o los que estén en día libre.
  - iv. Los aserraderos distribuyen sus envíos en la jornada laboral, de modo tal que el tiempo entre los envíos en un día dado es constante (por la magnitud de las distancias y que la jornada laboral de los aserraderos en horas de Sol no puede ocurrir que llegue un envío después de las 24:00).

iii. *Stockouts*

- a. Ante un *stockout* se detiene la operación de los aserraderos hasta que el inventario esté nuevamente en al menos 1000 toneladas.
- b. Si en algún momento del día en una papelerera se tiene un *stock* de madera menor a 20.000 toneladas (riesgo de *stockout*) esta pedirá adicionalmente la cantidad máxima que los aserraderos pueden enviar en el resto del día (según nivel de cercanía), hasta completar (de ser posible) una demanda adicional de  $20.000 - Q + R$ , donde Q representa la cantidad de toneladas en el depósito y R es la cantidad de demanda del día que aún no ha llegado (para sobrepasar las 20.000 y no se quede en riesgo de que ocurra la situación nuevamente).



iv. Distribución espacial de las instalaciones

- a. La distribución espacial de los aserraderos y las plantas es de acuerdo a una grilla cuadrada de 11 por 11, donde cada lado mide 110 millas, en ella se ubican los molinos en las posiciones centrales y en cada una de las casillas restantes un aserradero, quedando 7 desocupadas (ver Ilustración 2).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
32	33	34	35		36		37	38	39	40
41	42	43		KOALA		PAPERTECH		44	45	46
47	48	49	50				51	52	53	54
55	56	57	58		BRIGHT		59	60	61	62
63	64	65	66	67		68	69	70	71	72
73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83
	84	85	86	87	88	89	90	91	92	
		93	94	95	96	97	98	99	100	
				KOALA PAPER						
				PAPERTECH						
				BRIGHT						
				NO WOOD						

Ilustración 2: distribución espacial de los aserraderos y las papeleras, indexados por los números de 1 a 100

- b. La forma de funcionamiento inicial (*basemodel*), es decir, la asignación entre aserraderos y plantas, es la que indica la Ilustración 2 (se hizo al azar con un código programado en Python<sup>1</sup>).

<sup>1</sup> Lo que hace el código es generar una lista en que se mantienen las proporciones deseadas y luego reordenarlas aleatoriamente para hacer la asignación a las papeleras, para más detalle vea el anexo disponible al final del documento.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
 ESCUELA DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y SISTEMAS  
 ICS3723 – SIMULACIÓN

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
32	33	34	35		36		37	38	39	40
41	42	43		KOALA		PAPERTECH		44	45	46
47	48	49	50				51	52	53	54
55	56	57	58		BRIGHT		59	60	61	62
63	64	65	66	67		68	69	70	71	72
73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83
	84	85	86	87	88	89	90	91	92	
		93	94	95	96	97	98	99	100	
		KOALA PAPER								
		PAPERTECH								
		BRIGHT								
		NO WOOD								

Ilustración 3: asignación aserraderos-plantas

- c. Para que los camiones viajen desde un aserradero a una planta respectiva se considerarán caminos cada 2 filas de la grilla, con una circunvalación en el centro, como se muestra en la Ilustración 3. Así, cada aserradero enviará sus camiones por la carretera que pasa por su costado.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
32	33	34	35		36		37	38	39	40
41	42	43		KOALA		PAPERTECH		44	45	46
47	48	49	50				51	52	53	54
55	56	57	58		BRIGHT		59	60	61	62
63	64	65	66	67		68	69	70	71	72
73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83
	84	85	86	87	88	89	90	91	92	
		93	94	95	96	97	98	99	100	
				KOALA PAPER						
				PAPERTECH						
				BRIGHT						
				NO WOOD						

Ilustración 4: distribución espacial de los caminos (en rojo)





## 2.5. Límites del modelo

La representación del funcionamiento original de la industria es limitada, pues se consideró, por la falta de organización colectiva, una distribución definida al azar entre los aserraderos y las plantas.

El modelo no considera fluctuación en los tiempos de trabajo de los aserraderos.

No considera eventuales variaciones de precio.

Se estima total fidelidad de los aserraderos con las asignaciones.

## 2.6. Supuestos

### i. Papeleras

- Para obtener el costo Inventario, se tomará la cantidad de madera en el inventario (toneladas de madera) a las 23:59 de cada día, se multiplicará por US\$50/tonelada luego este valor será multiplicado por la tasa de WACC dividida por 365. De esta manera obtendremos el costo diario de inventario.
- El tiempo que tome la circulación de un camión dentro de una papelera será proporcional a la distancia a recorrer (considerando la velocidad de 10mph) y a la saturación del centro de acopio de la planta. Es decir, si en el molino hay mucho inventario el camión deberá descargar en la entrada de la zona de depósito.
- La interpretación que se hará de la descripción del tiempo de pesaje que entrega el enunciado será mediante una distribución triangular de parámetros (2,2,7).
- El tiempo de descarga de un camión se comporta como una variable aleatoria normal de media 10 minutos y desviación estándar 2.
- El tiempo de mantención de las grúas, en base a lo descrito en el enunciado, se comporta de acuerdo a una distribución triangular de parámetros (1,1,5).

### i. Aserraderos

- No hay fallas en el funcionamiento de los camiones ni en la operación de los aserraderos.
- La cantidad máxima de camiones que puede salir en un día de un aserradero es determinada por la temporada, conforme a la Tabla 2.



Cargas por día	Meses
UniformeDiscreta(6,8)	Enero a marzo
95%UniformeDiscreta(3,5)  5% nada	Abril a mayo
UniformeDiscreta(5,7)	Otros meses

Tabla 2: distribución de camiones que salen de un aserradero

- c. Se considera que los días de no producción producto del clima son comunes a todos los aserraderos, pues enfrentan las mismas condiciones climáticas.
- d. Se considerará que el peso de un camión luego de ser cargado se comporta como una variable triangular de parámetros (25,30,35).
- e. El costo de regreso de los camiones es despreciable, por lo que se considera solo el costo de ida.

ii. Bosques de la región

- a. Se asume que el árbol talado en la región es *Pupulus tremuloides* (álamo temblón), esto pues es la principal especie usada para la producción papelera (Confederation of Paper Industries, 2008) disponible en Minnesota (Forest Service, 2008).
- b. Los bosques producen 35 toneladas/acre anualmente de materia procesable (Forest Service, 2008).
- c. Los árboles en las instalaciones de los aserraderos tienen entre 0 y 40 (distribución uniforme) años y se cortan solo estos últimos (Kidd,1998).
- d. Si se tiene que las papeleras consumen 60.000 toneladas al año no habrá problemas, pues se tienen aproximadamente 50.000 toneladas de árboles de cada edad, por lo tanto, en los dos años de simulación se tiene que la tasa de crecimiento será mayor a la tasa de tala.
- e. Los aserraderos plantan un árbol por cada árbol que cortan, de esta manera mantienen la tasa de regeneración en 1.



## 2.7. Variables aleatorias de **INPUT** y de **OUTPUT**

- I. Variables aleatorias de INPUT
  - a. Consumo diario de madera en Koala Paper: Normal(4000,200).
  - b. Consumo diario de madera en Bright: Normal(4000,100).
  - c. Consumo diario de madera PaperTech: Triangular(4500, 5000, 5500).
  - d. Tiempos de pesaje en cada papelera: Triangular(2,2,7).
  - e. Tiempo de descarga de los camiones: Normal(10,2).
  - f. Tiempo de mantención de las grúas: Triangular(1,1,5).
  - g. Cantidad máxima de camiones que sale en un día de un aserradero es determinada por la temporada, conforme a la Tabla 2.
  - h. Peso de los camiones luego de ser cargados: Triangular(25,30,35).
- II. Variables aleatorias de OUTPUT
  - a. Costo por *stockout*.
  - b. Costo por viajes.
  - c. Inventario promedio.
  - d. Costo en inventario.
  - e. Días perdidos por mal tiempo.
  - f. Cantidad de ocurrencias de *stockout*.
  - g. Máximo de madera cortada en un territorio.
  - h. Promedio de madera cortada por aserradero.
  - i. Cantidad de reparaciones de las grúas.
  - j. Días no trabajados producto de los *stockout*.

## 2.8. Eventos

Los eventos asociados a la entidad camión que producen cambios en el sistema y que serán simulados por el modelo son, en orden lógico, los siguientes:

- i. Un camión sale de su aserradero en dirección a la planta asignada.
- ii. Un camión llega al *scale-house* para el pesaje y papeleo de entrada.
- iii. Un camión sale del *scale-house* en dirección al depósito de madera.
- iv. Un camión llega al punto de descarga pertinente.
- v. Un camión sale de un punto de descarga.
- vi. Un camión llega nuevamente al *scale-house* para el re-pesaje de salida.
- vii. Un camión sale del *scale-house* en dirección a su aserradero.



Por otra parte, existen eventos asociados a las operaciones de planta, estos son:

- i. Una grúa de descarga necesita mantenimiento.
- ii. Ocurre un *stockout* que detiene las operaciones del molino hasta que el inventario llegue a 1.000.
- iii. El inventario baja de 20.000 y se asume una multa de \$1M.

### **2.9. Aspectos a estudiar (medidas de desempeño)**

- i. Costo de transporte total en el sistema.
- ii. Inventario Promedio en cada planta.
- iii. Costo total de inventario.
- iv. Gasto por penalización por bajo inventario.
- v. Cuántos días se perdieron debido al mal tiempo.
- vi. ¿Cuántos *stockouts* ocurrieron?
- vii. Cantidad máxima de madera talada en los territorios.
- viii. Cantidad promedio de madera cortada por aserradero.
- ix. Tiempo de espera promedio de cada *scalehouse* para camiones que llegan.
- x. Cuántas reparaciones de grúas ocurrieron en el año.
- xi. Días perdidos de producción en cada molino debido a *stockouts*.

## **3. Modelo computacional**

### **3.1. Descripción general**

Tal como se planificó el modelo conceptual (ver Ilustración 4) se construyó una grilla en un modelo SIMIO, manteniendo las proporciones que se definieron, ubicando las papeleras en el centro, los aserraderos en sus respectivas casillas y los caminos en las posiciones establecidas. Como se explicará con más detalle más adelante en los respectivos apartados, para modelar estos objetos se usaron *paths*, *servers* y subclases. Puede ver la Ilustración 5 para hacerse una primera idea general de cómo se usaron estos objetos de SIMIO y cómo interactúan entre sí (se explicará con más profundidad más adelante).

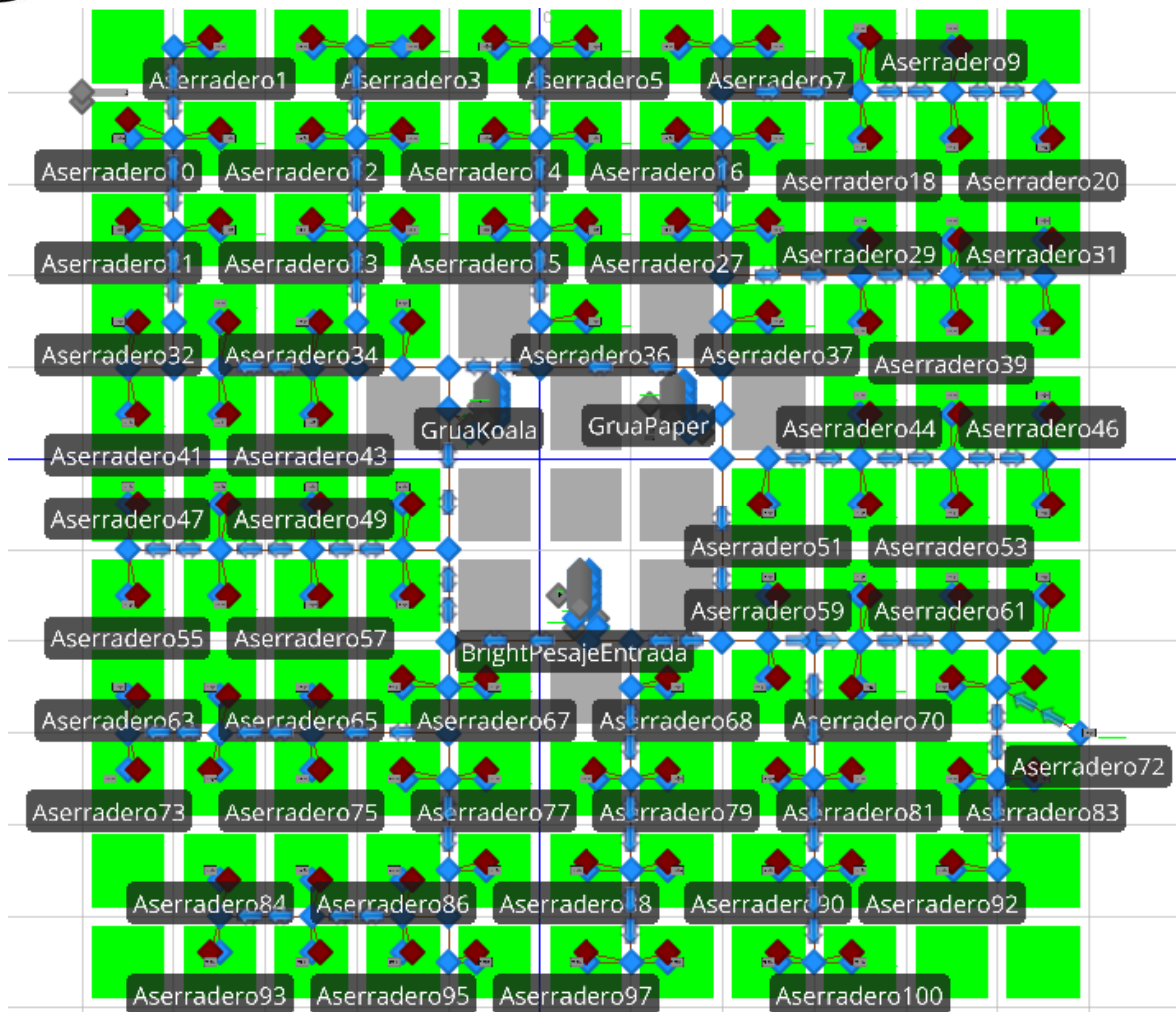


Ilustración 5: vista general del entorno gráfico de la simulación

### 3.2. Contexto

Conforme a la realidad del clima del *midwest* la cantidad de camiones cargados máxima que puede enviar un aserradero en un día viene limitada por las condiciones climáticas de acuerdo a lo que se indica en la Tabla 2. Para modelar esta situación se construyó un proceso que primero genera un vector con los días no trabajables (con las probabilidades indicadas en la Tabla 2), luego, otro proceso que genera el máximo de cargas que puede enviar en un día un aserradero, el que asigna cero automáticamente si el proceso anterior indica que no se puede trabajar ese día y si



no es así, genera dicha cantidad conforme a las distribuciones indicadas en la Tabla 2. Finalmente, se creó un tercer proceso que llama al anterior 100 veces, de modo tal que da lugar a una matriz que tiene la cantidad máxima de cargas diarias que puede enviar cada uno de los aserraderos.

### 3.3. Caminos

Todos los caminos de ida y vuelta se representaron con *Paths* unidireccionales dibujados a escala, donde 1 metro en el modelo equivale a 1 milla de la realidad. Dichos caminos son unidos por *TransferNodes*. La grilla que se representó para esto es la de la Ilustración 4, obteniéndose como resultado los caminos apreciables en la Ilustración 5.

### 3.4. Madera

En nuestro modelo la madera no es una entidad, sino un atributo del inventario de cada aserradero (una variable de estado de cada aserradero que tiene una capacidad máxima, de acuerdo a lo que se indicó en el punto 2.3 del informe) y de los camiones. Cuando un camión es cargado en un aserradero (ver el apartado Aserraderos para más detalle del proceso) se le aumenta su variable peso, la que indica la madera que este posee, mientras que cuando un camión es descargado (ver apartado Papeleras para más detalle del proceso) se le disminuye dicha variable y se aumenta la variable de inventario de la correspondiente papelera, lo que indica que aumentó el *stock* de madera de esta. Finalmente, cuando la madera es procesada por el *digestor* de una papelera, se disminuye la variable de inventario, lo que indica que se consumió la madera (ver apartado papeleras para más detalle).

### 3.5. Aserraderos

El aserradero es el lugar donde se extrae la madera para ser llevada a las papeleras. Estos aserraderos están representados por una subclase de *Source* (ver Ilustración 6) que mediante procesos crea y destruye entidades, según la cantidad que la papelera respectiva le haya solicitado (ver apartado Demanda para más detalle) y respetando el tope diario y su cantidad máxima de camiones (ver apartado Contexto para más detalle).

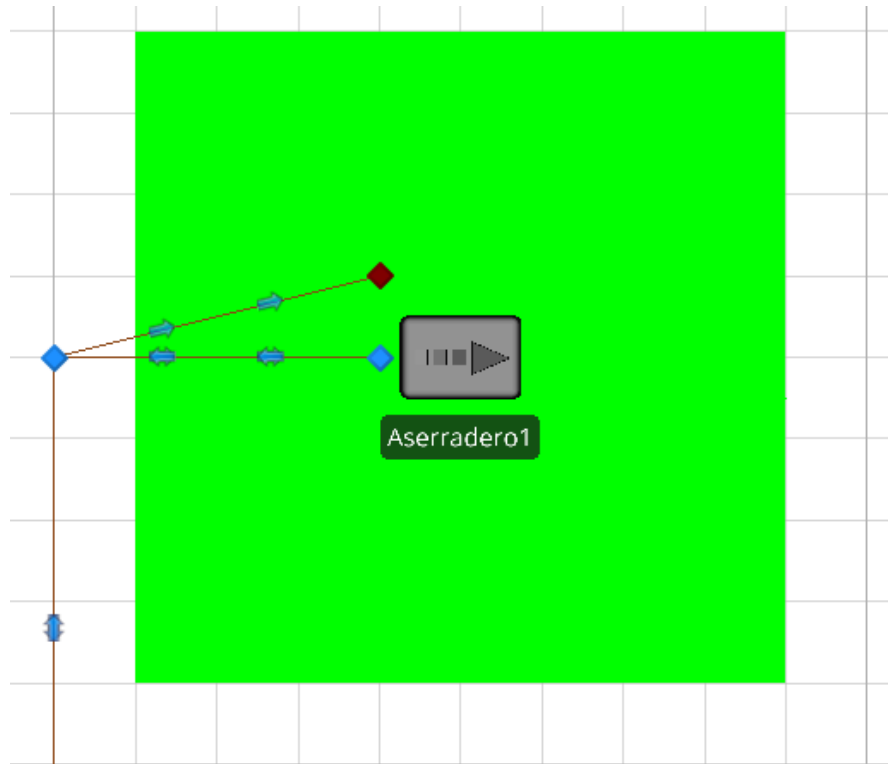


Ilustración 6: vista de un aserradero en la simulación

Un proceso importante que se realiza en los aserraderos es el de carga de camiones, el que se ejecuta cuando se crea una entidad. Este proceso asigna a la variable peso de la entidad (camión) una cantidad que corresponde a una instancia de una distribución Triangular(25,30,35).

Otra actividad relevante que se ejecuta es el de direccionamiento al *scalehouse* que corresponde a la papelera donde hay que llevar la madera, lo que se hace estableciendo como nodo de destino (del nodo de *Output* del aserradero) el nodo de *Input* del *scalehouse*.

También, una vez que los camiones regresan descargados, son “destruidos” (como entidad del sistema) mediante un proceso que se ejecuta en el “nodo de salida” del aserradero (nodo rojo en la Ilustración 6), el que ejecuta un proceso que destruye a las entidades cuando llegan.



### 3.6. Papeleras

Procesan la madera que piden a los aserraderos, para lo que poseen un sistema de pesaje de camiones, un centro de acopio y grúas para mover la madera de los camiones (ver Ilustración 7 para una idea sobre cómo se modelo la situación).

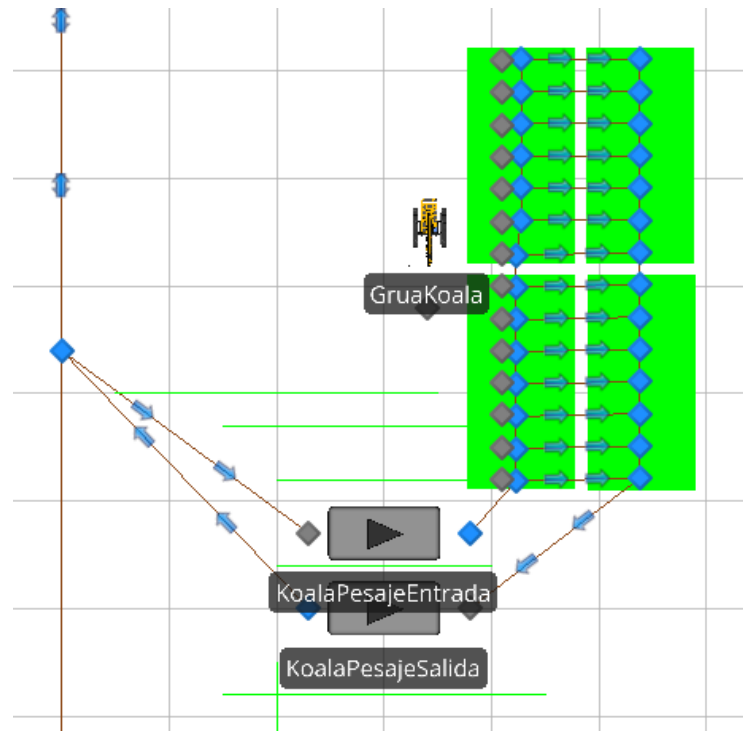


Ilustración 7: vista de una papelería en la simulación

En primer lugar, para modelar cada *scalehouse* (donde se ejecuta el proceso de pesaje) se utilizaron dos *servers* (ver Ilustración 7), uno en donde se hace el pesaje de entrada y uno donde se hace el pesaje de salida. En el pesaje de entrada se procesa con un tiempo que corresponde a una instancia de una variable Triangular(2,2,7), mientras que el proceso del pesaje de salida tiene un tiempo de un minuto.

Un aspecto sumamente relevante es el *routing* de los camiones que llegan para que estos puedan dejar la madera en el lugar del depósito que corresponde. Esto se hace mediante, en primer lugar, un proceso en el nodo de entrada del *server* donde se hace el pesaje de entrada. Allí se establece mediante un proceso el “peso” de algunos de los caminos en cero, conforme al nivel de inventario, de modo tal que





el camión es direccionado al lugar donde debe depositar la madera (mientras menor sea el inventario el camión deberá recorrer una mayor distancia en la zona de descarga, esto debido a que suponemos que el *digestor* está al final de dicha zona). En segundo lugar, en el nodo de salida de dicho *server* se cambia la velocidad de los camiones a 10mph, de modo que cumpla la normativa de seguridad. En tercer lugar, una vez que se llega al lugar donde se debe depositar la madera (representados por la columna izquierda de nodos celestes sobre el fondo verde en la Ilustración 7) se ejecuta un proceso que llama a una de las grúas (en el próximo párrafo se hablará de ellas con más detalle), se espera su llegada, se realiza la descarga del camión (poniendo su peso en cero y subiendo en inventario de la papeleras en la cantidad que tenía el camión), la que toma un tiempo que corresponde a una instancia de una variable Normal(10,2), paralelamente se actualiza una de las variables de estado (costo de transporte), sumándole el costo de haber traído el camión, el que se calcula como multiplicando el valor de costo por tonelada milla por la distancia recorrida por el camión. Una vez que el camión es descargado es dirigido al nodo de *input* del *server* que representa al pesaje de salida, allí, como el camión, allí es pesado nuevamente (lo que toma un minuto). En el nodo de salida de dicho *server* se direccionan los camiones “al nodo de salida” (estableciendo como nodo de destino el *HomeNode* de la entidad) del aserradero de donde vienen, donde son “destruidos” (ver el apartado Aserraderos para más detalle de este proceso).

Otro aspecto importante tiene relación con las grúas que utilizan las papeleras para vaciar los camiones, estas son seis y fueron modeladas mediante el objeto *vehicle* de SIMIO, donde se estableció la cantidad inicial de seis, su velocidad de movimiento (la que indica el enunciado), sus tiempos de falla técnica (cada 250 horas de trabajo) y los tiempos de reparación (Triangular(1,1,5)).

Debe mencionarse también que, como se trata de papeleras, hay consumo de madera, el que se modeló mediante dos *timers*, uno con un periodo de 24 horas que todos los días a las 00:00 instancia el consumo del día y otro con un periodo de 30 minutos que disminuye el inventario en 1/48 del consumo del día (a no ser que deje el inventario en 0). Debe indicarse también que el *timer* de 24 horas también actualiza el costo de inventario, multiplicando el costo por tonelada diario por la cantidad de toneladas de madera que hay en el inventario y sumando esta cantidad a una variable que almacena el costo acumulado de inventario.



Dada la complejidad del proceso de generación de demanda por parte de los aserraderos, esta será tratada en detalle en su propio apartado (3.7).

### 3.7. Camiones

Fueron modelados como *ModelEntity*. Como deben partir de los aserraderos y volver a ellos ingresan al sistema a través de *servers* en la ubicación de los aserraderos (ver Anexo 6 para conocer el detalle computacional del proceso de creación y de carga). Para administrar la madera que transporta cada uno, mediante la herramienta *States* en *ModelEntity*, se generó la variable “peso”, la que representa la cantidad de madera que tiene el camión (no nos interesa el peso del camión en sí, por lo que solo nos referimos a la madera). Como inicialmente se usan los caminos convencionales con el camión cargado se establece su velocidad inicial en 45mph.

En su trayecto los camiones son cargados en los aserraderos y dirigidos al *scalehouse* de la papeleras que les corresponde (ver el apartado Aserraderos para más detalle), luego allí se les aplican los procesos de pesaje, se les indica dónde depositar la madera y se les redirige de vuelta a un nodo en sus aserraderos (ver apartado Papeleras para más detalle). Finalmente, allí son destruidos mediante un *process* (ver el apartado Aserraderos para más detalle).

Para evitar que en el sistema haya más camiones que los que realmente tiene un aserradero en el proceso de generación de entidades se puso una restricción que indica que no puede haber más camiones trabajando simultáneamente que los camiones que tiene el aserradero (ver apartado de Demanda para más detalles).

### 3.8. Demanda

Para generar la demanda se considera el valor del consumo diario (explicado en el punto 3.6). Esta es satisfecha (idealmente) mediante la generación de entidades (camiones cargados) en los *source* que representan a los aserraderos. La cantidad de entidades que se debe generar en un aserradero en un día para una papeleras viene dada por el siguiente proceso desencadenado por un *timer* cuyo periodo es de 24 horas. Se obtiene la parte entera de la división de la demanda diaria por 30 (esperanza del peso de un camión), esto da el número de cargas necesarias en un día. Luego se obtiene la parte entera de la división de dicho valor por el número de



aserraderos asociados a la papelera. Esto es, en principio, el número de entidades que debe generar en cada aserradero, no obstante, como queda parte de la demanda no satisfecha, se añade, según nivel de cercanía, una carga a cada aserradero hasta que se supere la demanda diaria (para el algoritmo se respetan los límites de producción diarios de cada aserradero según el clima, los días de descanso y la cantidad de camiones que tiene cada aserradero, distribuyendo entre el resto lo que no puedan satisfacer, no considerando más en el algoritmo a los que no puedan aportar más, de modo que no se les asignen más cargas).

Con este número para cada aserradero, el proceso desencadena un *timer* que se inicia cuando sale el Sol y se detiene cuando este se pone (se construyó una tabla con la hora de salida y puesta del Sol conforme al año 2016 según el sitio web [www.tutiempo.net/calendario-solar/](http://www.tutiempo.net/calendario-solar/)) y cuyo periodo es dado por el número de horas de Sol del día dividido por el número de cargas necesarias menos 1. Este *timer* desencadena la generación de una entidad. De modo que con la generación de estas se satisface la demanda de las papeleras.

Para más detalle ver Anexo 8, donde se presenta el proceso computacional.

### 3.9. Stockouts

Un *stockout* ocurre cuando el inventario llega a cero (ver Anexo 7 para detalle computacional del proceso de gestión de *stockouts*). Mediante un proceso desencadenado por un *monitor* del inventario (que revisa cuando este cruza el cero) se desactiva el consumo del *digester* de la respectiva papelera y se disminuye en una unidad el divisor de la demanda (en el proceso descrito para la generación de la demanda descrito en el punto 3.8), valor utilizado para calcular la cantidad de camiones cargados a solicitar en el día. Luego el proceso espera hasta que el inventario llegue a mil toneladas para reactivar el *digester*.

También mediante monitores, cuando el inventario baja de las 20.000 toneladas se aplica una multa de un millón de dólares, lo que es modelado mediante una variable de estado que parte en cero y aumenta en dicha cantidad cuando se produce la condición de multa.

## 4. Resultados de la simulación

Luego de realizar diez réplicas de la simulación se obtuvo los siguientes resultados.



#### 4.1. Costo de transporte

En las 10 réplicas se obtuvo los siguientes datos:

Costo total de transporte									
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Réplica 5	Réplica 6	Réplica 7	Réplica 8	Réplica 9	Réplica 10
76970218	77619811,9	77691015,7	77744285,9	77767860,3	77908004,3	77914491,2	78034772,3	78068819,9	78550320,9

Tabla 3: resultados de las réplicas para la simulación en costo total de transporte

Gráficamente:

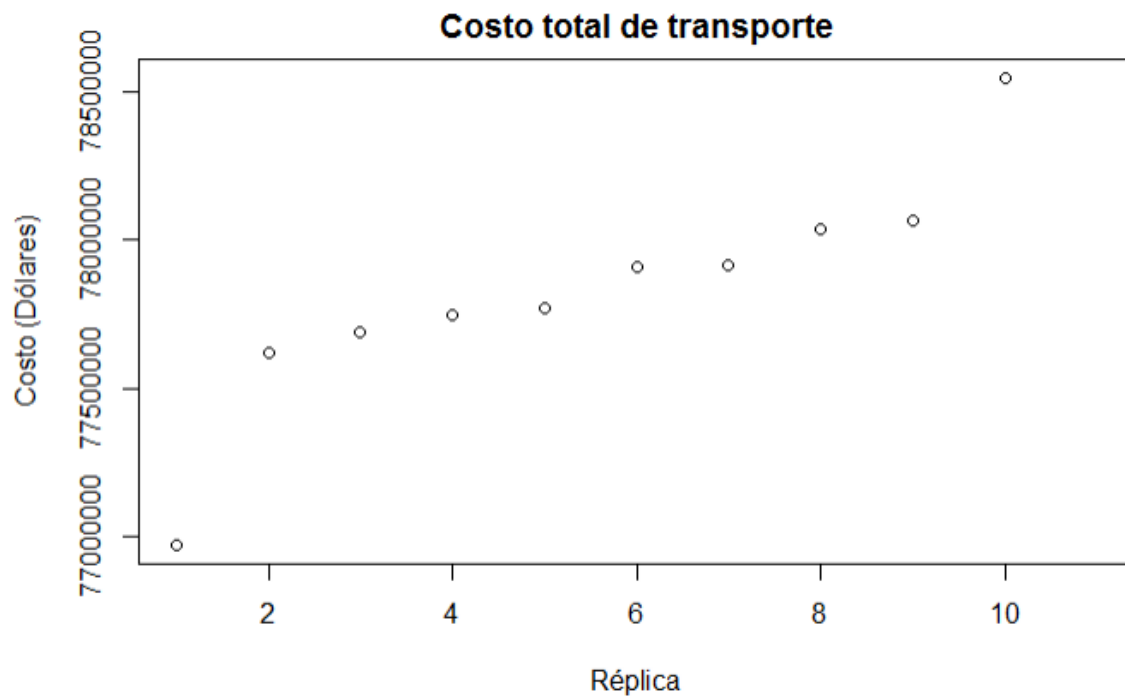


Ilustración 8: resultados de las réplicas para la simulación en costo total de transporte

De donde tenemos un gasto promedio de 77.826.960 dólares, con una desviación estándar de 400.678,4. Como se está ante un conjunto de variables aleatorias, independientes e idénticamente distribuidas y se tiene un conjunto considerable de muestras, en base al Teorema del Límite Central se pueden plantear los siguientes intervalos de confianza (con un 95% de confianza).

$$[77.540.332, 78.113.588]$$



## 4.2. Inventario promedio

Para Koala en las 10 réplicas se obtuvo los siguientes datos:

Inventario promedio en Koala									
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Réplica 5	Réplica 6	Réplica 7	Réplica 8	Réplica 9	Réplica 10
67248,7198	67592,9926	68455,6892	68788,425	69116,2845	69195,2682	69386,3158	69620,2824	69709,3032	70132,6624

Tabla 4: resultados de las réplicas para la simulación en inventario promedio en Koala

Gráficamente:

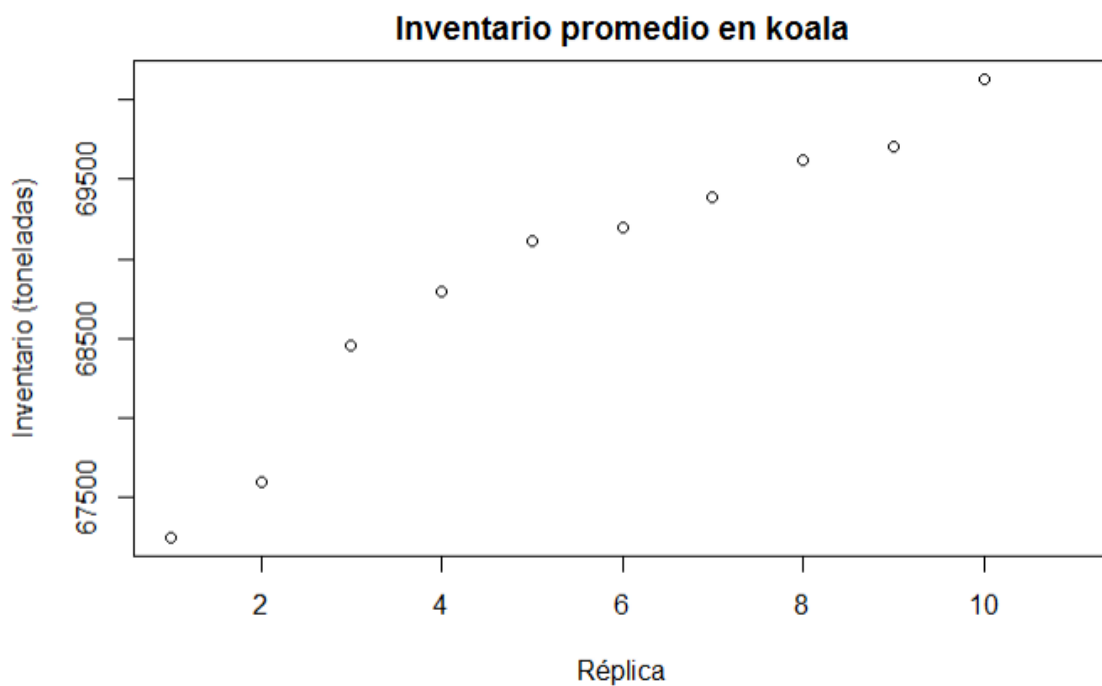


Ilustración 9: resultados de las réplicas para la simulación en inventario promedio en Koala

De donde tenemos un inventario promedio de 68.924,59 toneladas, con una desviación estándar de 925,1131. Como se está ante un conjunto de variables aleatorias, independientes e idénticamente distribuidas y se tiene un conjunto considerable de muestras, en base al Teorema del Límite Central se pueden plantear los siguientes intervalos de confianza (con un 95% de confianza).



[68.262,69.586]

Para PaperTech en las 10 réplicas se obtuvo los siguientes datos:

Inventario promedio en PaperTech									
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Réplica 5	Réplica 6	Réplica 7	Réplica 8	Réplica 9	Réplica 10
45034,099	45050,1329	45206,3173	45258,833	45396,4448	45437,1259	45537,3011	45657,8065	45956,0039	46389,8626

Tabla 5: resultados de las réplicas para la simulación en inventario promedio en PaperTech

Gráficamente:

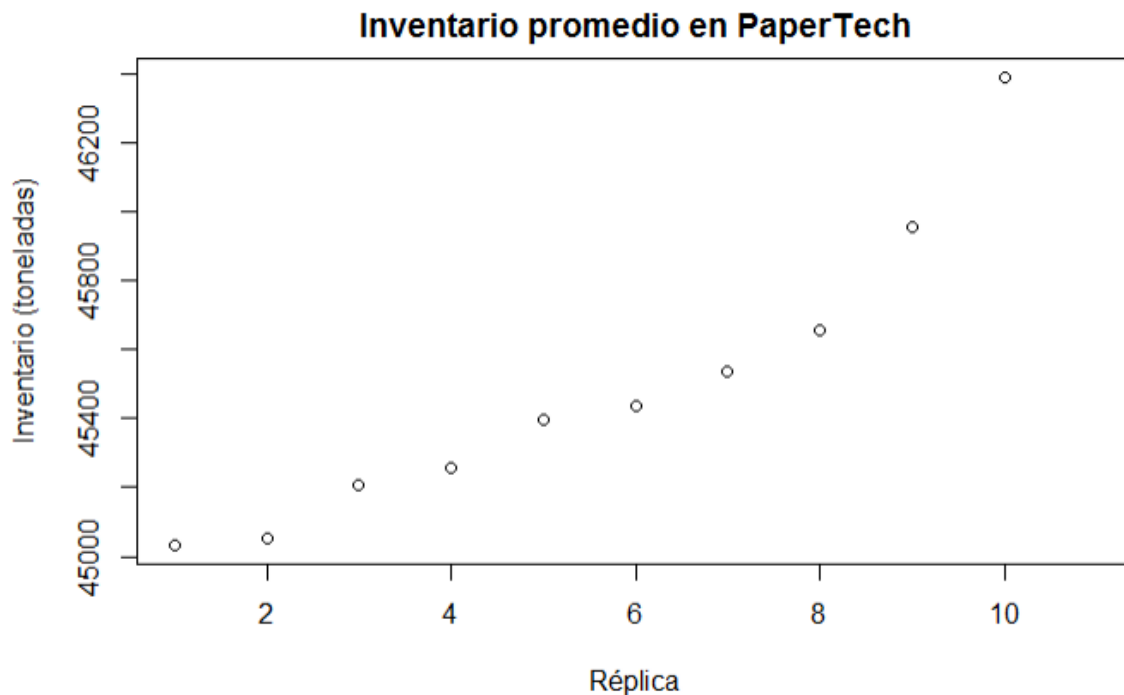


Ilustración 10: resultados de las réplicas para la simulación en inventario promedio en PaperTech

De donde tenemos un inventario promedio de 45.492,39 toneladas, con una desviación estándar de 422,1693. Como se está ante un conjunto de variables aleatorias, independientes e idénticamente distribuidas y se tiene un conjunto



considerable de muestras, en base al Teorema del Límite Central se pueden plantear los siguientes intervalos de confianza (con un 95% de confianza).

[45.190,45794]

Para Bright en las 10 réplicas se obtuvo los siguientes datos:

Inventario promedio en Bright									
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Réplica 5	Réplica 6	Réplica 7	Réplica 8	Réplica 9	Réplica 10
20700,8631	20709,9395	20881,1262	21949,7506	22710,6623	23006,1174	23611,5538	23660,1687	26239,6306	26688,0378

Tabla 6: resultados de las réplicas para la simulación en inventario promedio en Bright

Gráficamente:

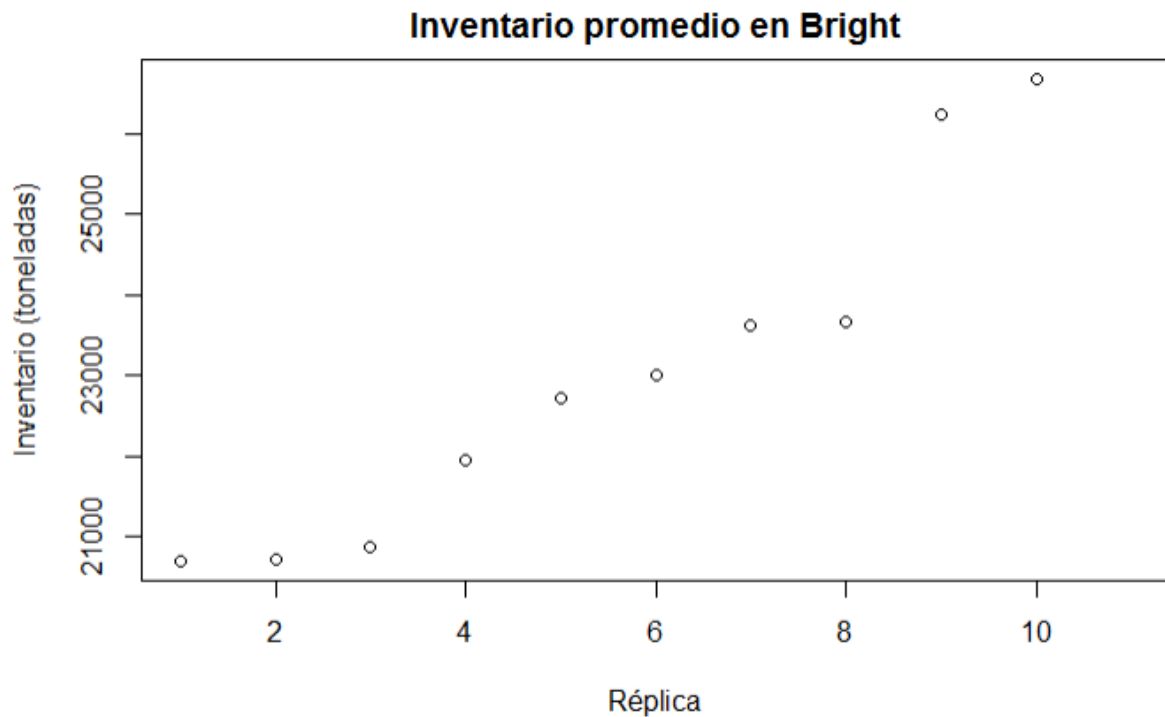


Ilustración 11: resultados de las réplicas para la simulación en inventario promedio en Bright



De donde tenemos un inventario promedio de 23.015,79 toneladas, con una desviación estándar de 2.137,261. Como se está ante un conjunto de variables aleatorias, independientes e idénticamente distribuidas y se tiene un conjunto considerable de muestras, en base al Teorema del Límite Central se pueden plantear los siguientes intervalos de confianza (con un 95% de confianza).

[21.486, 24.544]

### 4.3. Costo total de inventario

En las 10 réplicas se obtuvo los siguientes datos:

Costo total de inventario									
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Réplica 5	Réplica 6	Réplica 7	Réplica 8	Réplica 9	Réplica 10
810727,668	815739,263	817320,635	817784,397	819071,638	824735,386	826244,56	827171,606	836942,578	850228,59

Tabla 7: resultados de las réplicas para la simulación en costo total de inventario  
 Gráficamente:

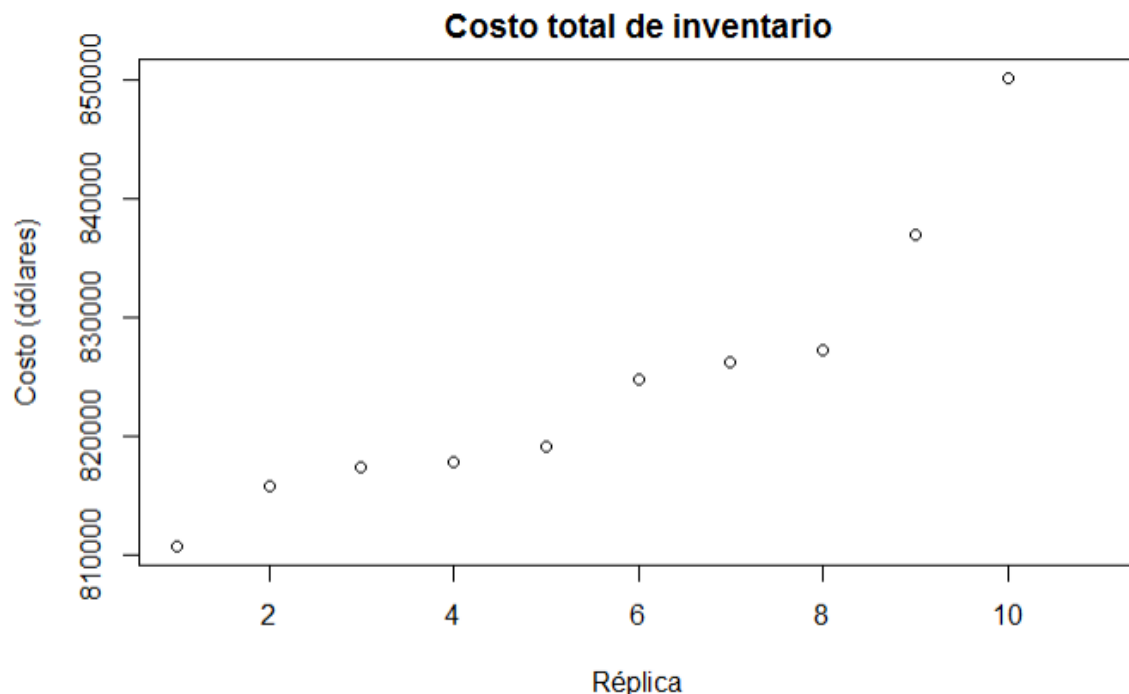


Ilustración 12: resultados de las réplicas para la simulación en costo total de inventario





De donde tenemos un costo promedio de 824.596,6 dólares, con una desviación estándar de 11.640,25. Como se está ante un conjunto de variables aleatorias, independientes e idénticamente distribuidas y se tiene un conjunto considerable de muestras, en base al Teorema del Límite Central se pueden plantear los siguientes intervalos de confianza (con un 95% de confianza).

$$[816.269, 832.923]$$

#### 4.4. Gastos por penalización debido a inventario bajo

Para Koala en las 10 réplicas se obtuvo los siguientes datos:

Gasto en multas por inventario bajo para Koala									
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Réplica 5	Réplica 6	Réplica 7	Réplica 8	Réplica 9	Réplica 10
2000000	6000000	7000000	8000000	9000000	11000000	11000000	13000000	14000000	19000000

Tabla 8: resultados de las réplicas para la simulación en gasto en multas por inventario bajo en Koala

Gráficamente:

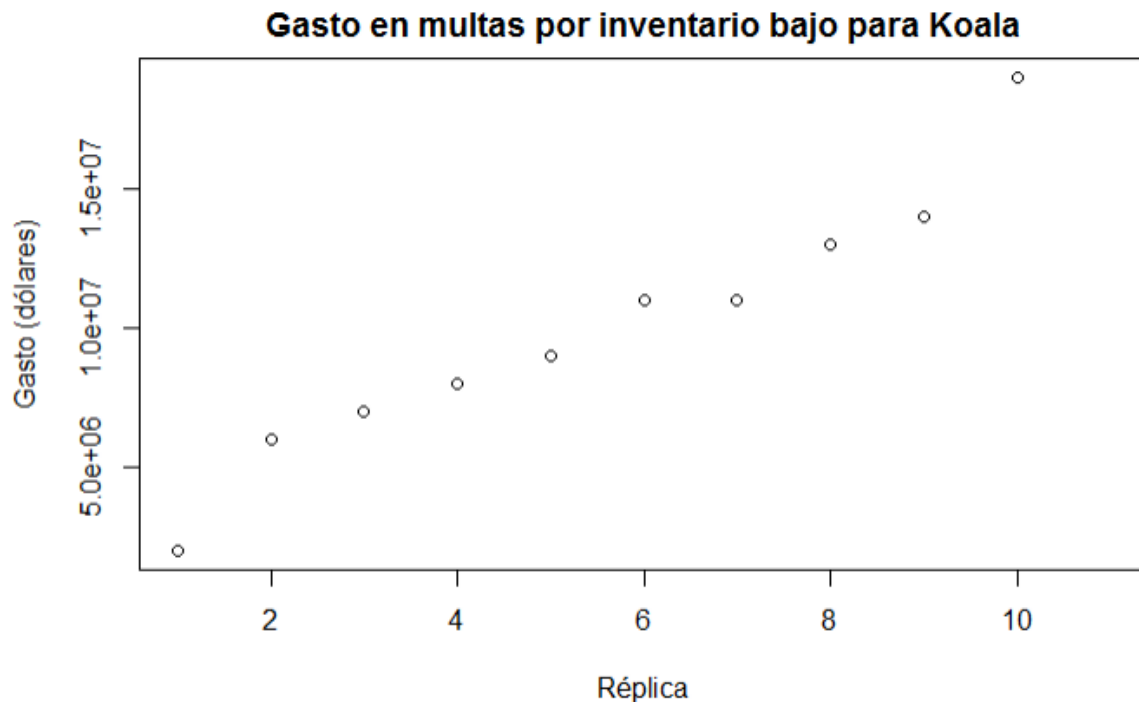


Ilustración 13: resultados de las réplicas para la simulación en gasto en multas por inventario bajo en Koala



De donde tenemos un gasto promedio de 10.000.000 dólares, con una desviación estándar de 4.737.557. Como se está ante un conjunto de variables aleatorias, independientes e idénticamente distribuidas y se tiene un conjunto considerable de muestras, en base al Teorema del Límite Central se pueden plantear los siguientes intervalos de confianza (con un 95% de confianza).

$$[6.610.956; 13.389.044]$$

Para PaperTech en las 10 réplicas se obtuvo los siguientes datos:

Gasto en multas por inventario bajo para PaperTech									
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Réplica 5	Réplica 6	Réplica 7	Réplica 8	Réplica 9	Réplica 10
18000000	21000000	24000000	27000000	28000000	29000000	30000000	33000000	37000000	41000000

Tabla 9: resultados de las réplicas para la simulación en gasto en multas por inventario bajo en PaperTech

Gráficamente:

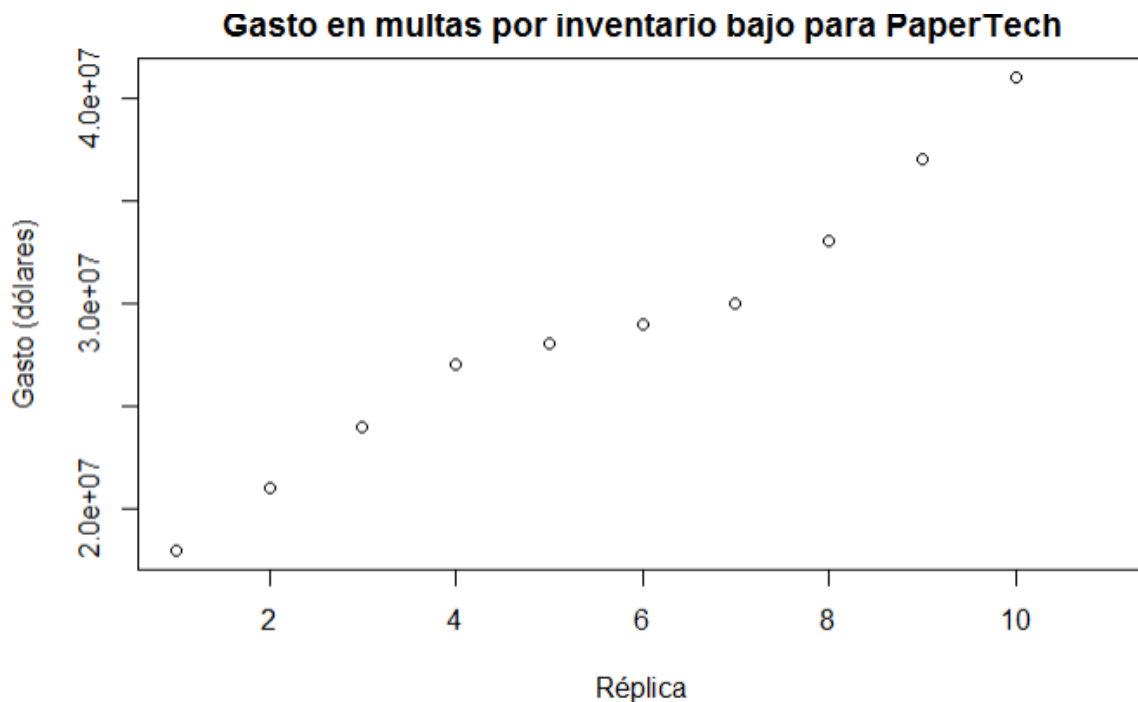


Ilustración 14: resultados de las réplicas para la simulación en gasto en multas por inventario bajo en PaperTech



De donde tenemos un gasto promedio de 28.800.000 dólares, con una desviación estándar de 6.988.880. Como se está ante un conjunto de variables aleatorias, independientes e idénticamente distribuidas y se tiene un conjunto considerable de muestras, en base al Teorema del Límite Central se pueden plantear los siguientes intervalos de confianza (con un 95% de confianza).

$$[23.800.456; 33.799.544]$$

Para Bright en las 10 réplicas se obtuvo los siguientes datos:

Gasto en multas por inventario bajo para Bright									
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Réplica 5	Réplica 6	Réplica 7	Réplica 8	Réplica 9	Réplica 10
8000000	10000000	12000000	16000000	19000000	20000000	23000000	24000000	27000000	29000000

Tabla 10: resultados de las réplicas para la simulación en gasto en multas por inventario bajo para Bright

Gráficamente:

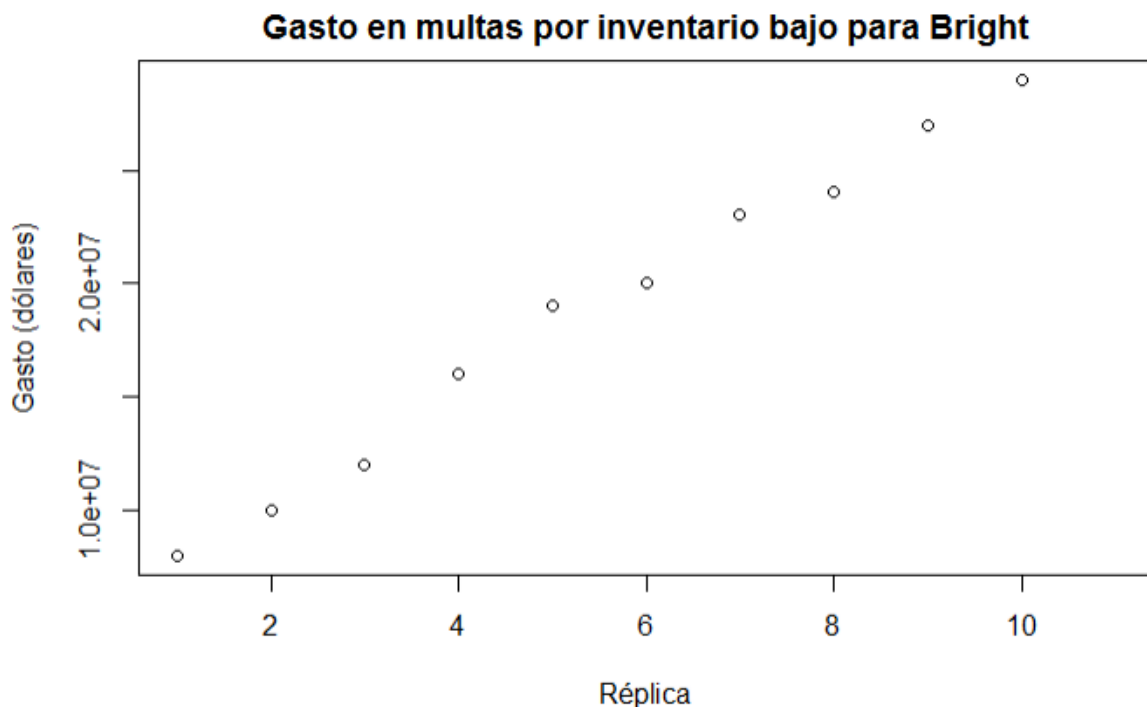


Ilustración 15: resultados de las réplicas para la simulación en gasto en multas por inventario bajo para Bright



De donde tenemos un gasto promedio de 18.800.000 dólares, con una desviación estándar de 7.192.589. Como se está ante un conjunto de variables aleatorias, independientes e idénticamente distribuidas y se tiene un conjunto considerable de muestras, en base al Teorema del Límite Central se pueden plantear los siguientes intervalos de confianza (con un 95% de confianza).

$$[13.654.732; 23.945.268]$$

#### 4.5. Días perdidos por mal tiempo

En las 10 réplicas se obtuvo los siguientes datos:

Días perdidos por mal tiempo									
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Réplica 5	Réplica 6	Réplica 7	Réplica 8	Réplica 9	Réplica 10
2	2	3	3	4	5	5	5	5	7

Tabla 11: resultados de las réplicas para la simulación en días perdidos por mal tiempo  
Gráficamente:

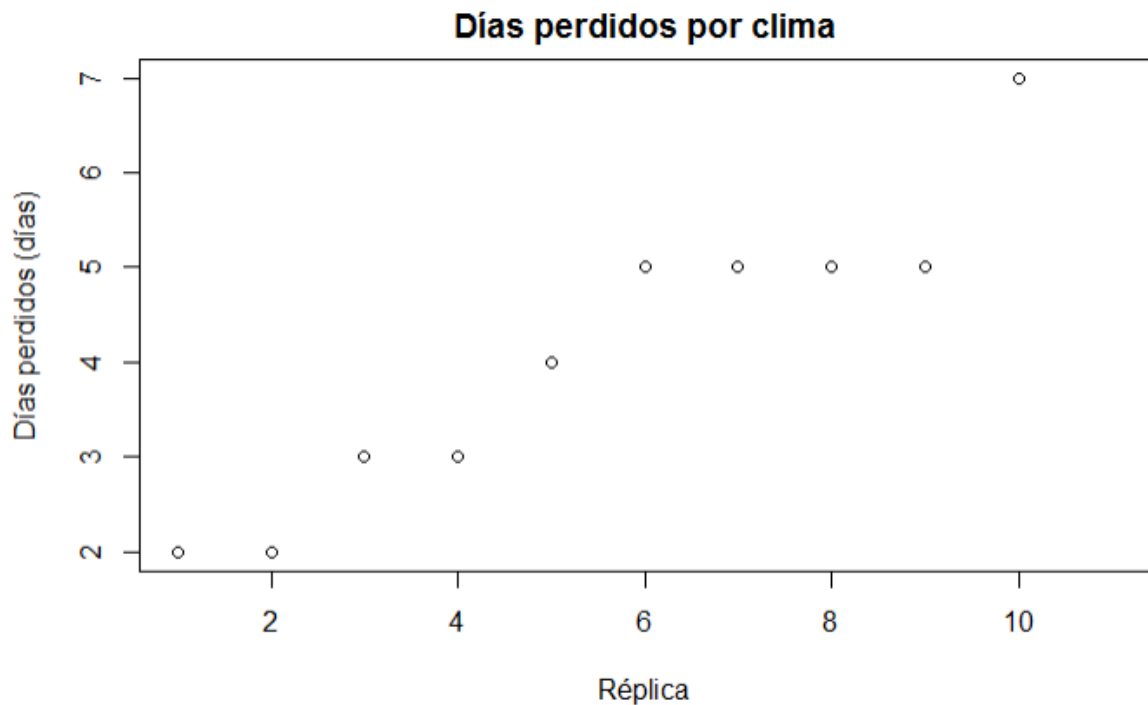


Ilustración 16: resultados de las réplicas para la simulación en días perdidos por mal tiempo



De donde tenemos una cantidad promedio de 4,1 días, con una desviación estándar de 1,595131. Como se está ante un conjunto de variables aleatorias, independientes e idénticamente distribuidas y se tiene un conjunto considerable de muestras, en base al Teorema del Límite Central se pueden plantear los siguientes intervalos de confianza (con un 95% de confianza).

$$[2,958912; 5,241088]$$

#### 4.6. Número de *stockouts*

En las 10 réplicas se obtuvo los siguientes datos:

Número de <i>Stockouts</i>									
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Réplica 5	Réplica 6	Réplica 7	Réplica 8	Réplica 9	Réplica 10
224	232	242	244	251	258	267	271	272	291

Tabla 12: resultados de las réplicas para la simulación en número de *stockouts*  
Gráficamente:

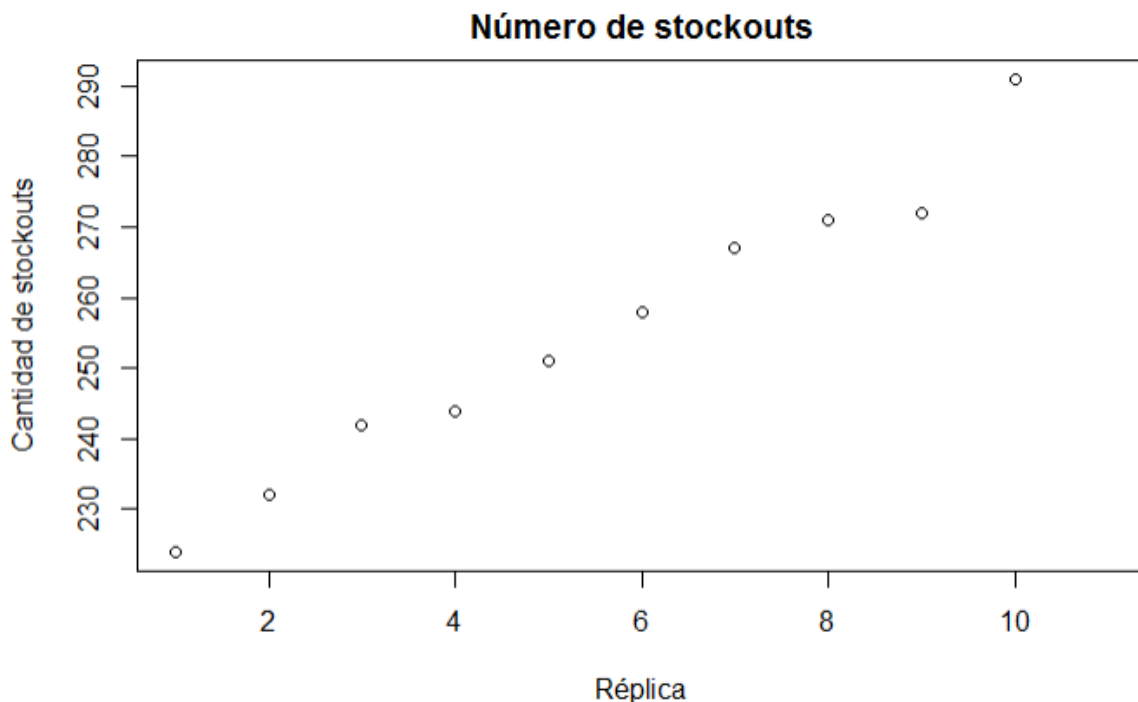


Ilustración 17: resultados de las réplicas para la simulación en número de *stockouts*



De donde tenemos una cantidad promedio de 255,2 *stockouts*, con una desviación estándar de 20,51991. Como se está ante un conjunto de variables aleatorias, independientes e idénticamente distribuidas y se tiene un conjunto considerable de muestras, en base al Teorema del Límite Central se pueden plantear los siguientes intervalos de confianza (con un 95% de confianza).

$$[240,5209; 269,879]$$

#### 4.7. Cantidad máxima de madera talada en los territorios

En las 10 réplicas se obtuvo los siguientes datos:

Cantidad máxima de madera talada en los territorios									
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Réplica 5	Réplica 6	Réplica 7	Réplica 8	Réplica 9	Réplica 10
129476,359	129510,065	129856,186	130213,715	131452,547	131610,66	131875,048	131965,802	132313,874	132972,933

Tabla 13: resultados de las réplicas para la simulación en cantidad máxima de madera talada en los territorios

Gráficamente:

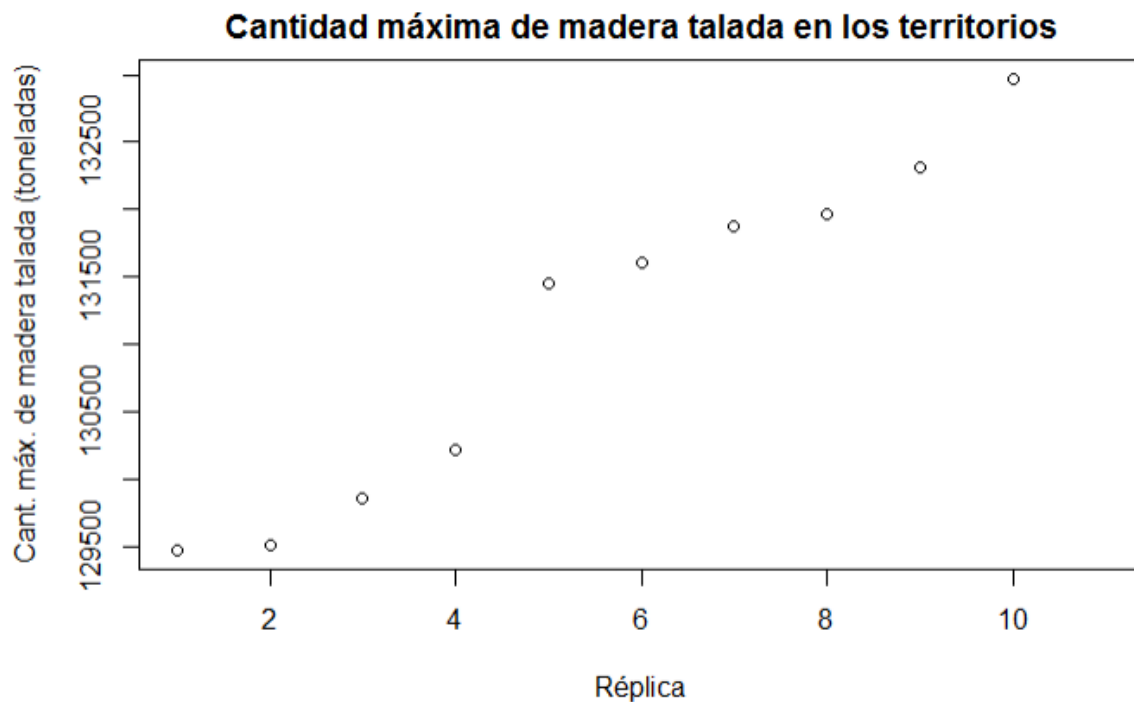


Ilustración 18: resultados de las réplicas para la simulación en cantidad máxima de madera talada en los territorios



De donde tenemos una cantidad promedio de 131124,7 toneladas, con una desviación estándar de 1256,419. Como se está ante un conjunto de variables aleatorias, independientes e idénticamente distribuidas y se tiene un conjunto considerable de muestras, en base al Teorema del Límite Central se pueden plantear los siguientes intervalos de confianza (con un 95% de confianza).

$$[130225,9;132023,5]$$

#### 4.8. Cantidad promedio de madera cortada por aserradero

En las 10 réplicas se obtuvo los siguientes datos:

Cantidad promedio talada en los aserraderos									
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Réplica 5	Réplica 6	Réplica 7	Réplica 8	Réplica 9	Réplica 10
95895,3284	96261,3105	96340,4293	96366,5502	96397,8062	96445,5281	96471,5293	96526,4905	96561,1829	96737,7667

Tabla 14: resultados de las réplicas para la simulación en cantidad promedio talada en los aserraderos

Gráficamente:

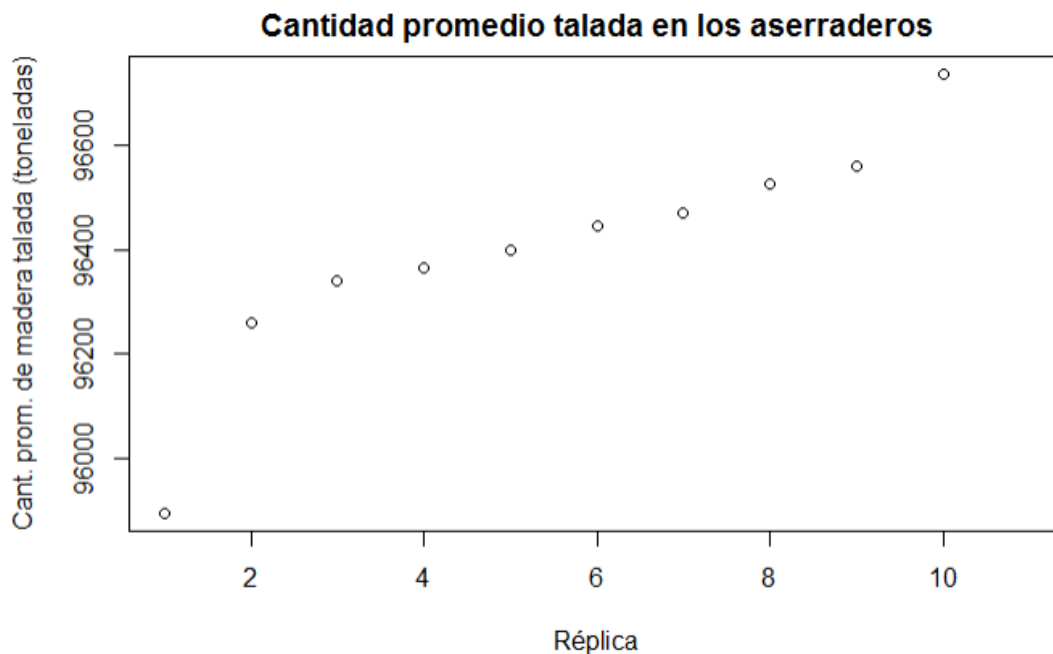


Ilustración 19: resultados de las réplicas para la simulación en cantidad promedio talada en los aserraderos



De donde tenemos una cantidad promedio de 96.400,39 toneladas, con una desviación estándar de 221,5738. Como se está ante un conjunto de variables aleatorias, independientes e idénticamente distribuidas y se tiene un conjunto considerable de muestras, en base al Teorema del Límite Central se pueden plantear los siguientes intervalos de confianza (con un 95% de confianza).

$$[96.241,89;96.558,90]$$

#### 4.9. Tiempo de espera promedio en cada *scalehouse*

Para Koala en las 10 réplicas se obtuvo los siguientes datos:

Tiempo de espera promedio en <i>scalehouse</i> de entrada de Koala									
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Réplica 5	Réplica 6	Réplica 7	Réplica 8	Réplica 9	Réplica 10
0,12033175	0,13071826	0,13162561	0,13202847	0,13220454	0,13237048	0,13414583	0,13473917	0,13658814	0,13734261

Tabla 15: resultados de las réplicas para la simulación en tiempo de espera promedio en *scalehouse* de entrada de Koala

Gráficamente:

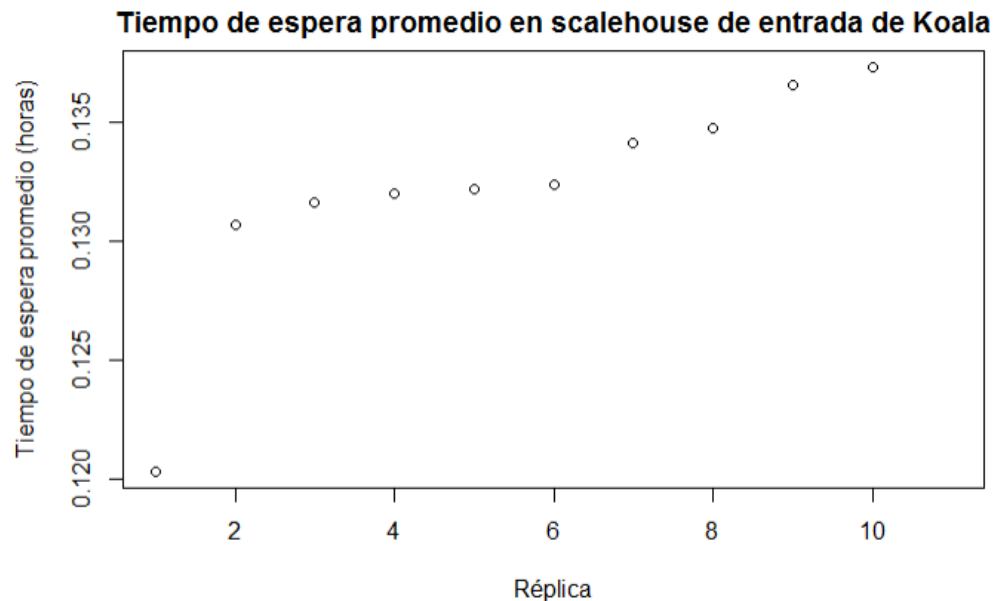


Ilustración 20: resultados de las réplicas para la simulación en tiempo de espera promedio en *scalehouse* de entrada de Koala





De donde tenemos un tiempo promedio de 0,1322095 horas, con una desviación estándar de 0,004706664. Como se está ante un conjunto de variables aleatorias, independientes e idénticamente distribuidas y se tiene un conjunto considerable de muestras, en base al Teorema del Límite Central se pueden plantear los siguientes intervalos de confianza (con un 95% de confianza).

$$[0,1288425;0,1355764]$$

Para PaperTech en las 10 réplicas se obtuvo los siguientes datos:

Tiempo de espera promedio en scalehouse de entrada de PaperTech									
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Réplica 5	Réplica 6	Réplica 7	Réplica 8	Réplica 9	Réplica 10
0,43308008	0,43339198	0,43500435	0,43746107	0,4376838	0,44084709	0,44257142	0,44302443	0,4433965	0,44899391

Tabla 16: resultados de las réplicas para la simulación en tiempo de espera promedio en *scalehouse* de entrada de PaperTech

Gráficamente:

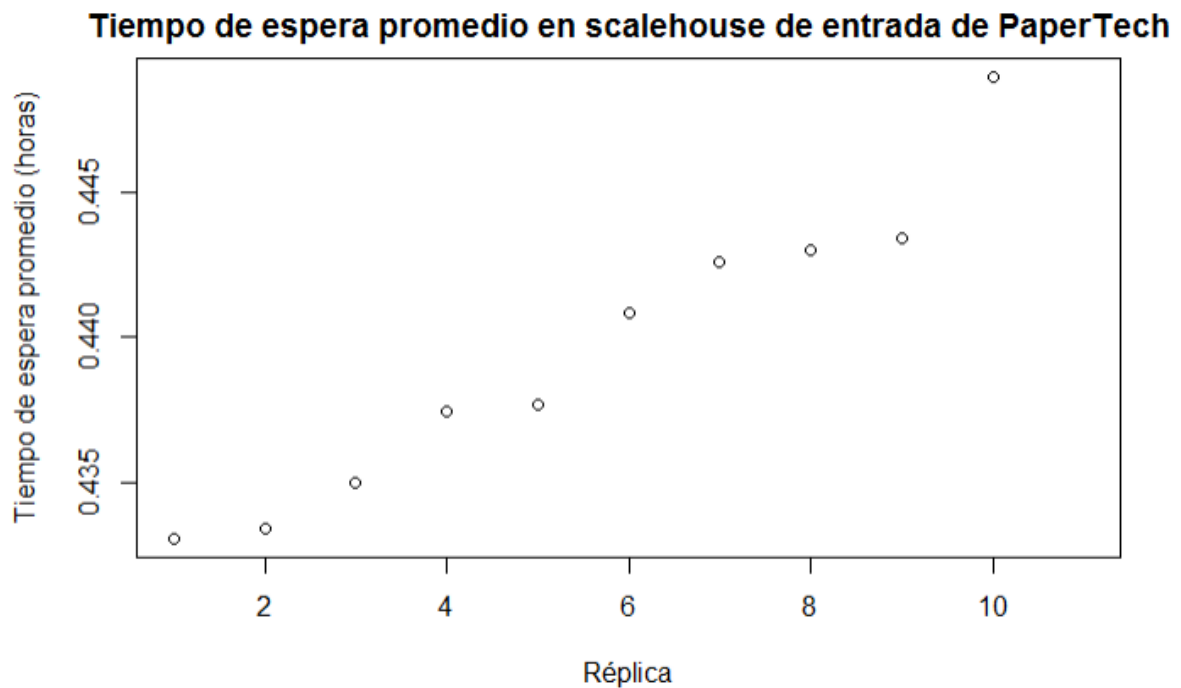


Ilustración 21: resultados de las réplicas para la simulación en tiempo de espera promedio en *scalehouse* de entrada de PaperTech



De donde tenemos un tiempo promedio de 0,4395455 horas, con una desviación estándar de 0,005111602. Como se está ante un conjunto de variables aleatorias, independientes e idénticamente distribuidas y se tiene un conjunto considerable de muestras, en base al Teorema del Límite Central se pueden plantear los siguientes intervalos de confianza (con un 95% de confianza).

$$[0,4358888;0,4432021]$$

Para Bright en las 10 réplicas se obtuvo los siguientes datos:

Tiempo de espera promedio en scalehouse de entrada de Bright									
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Réplica 5	Réplica 6	Réplica 7	Réplica 8	Réplica 9	Réplica 10
0,219076	0,22144041	0,22152344	0,22316784	0,22510355	0,22674372	0,22826863	0,22900837	0,23048924	0,23214346

Tabla 17: resultados de las réplicas para la simulación en tiempo de espera promedio en *scalehouse* de entrada de Bright

Gráficamente:

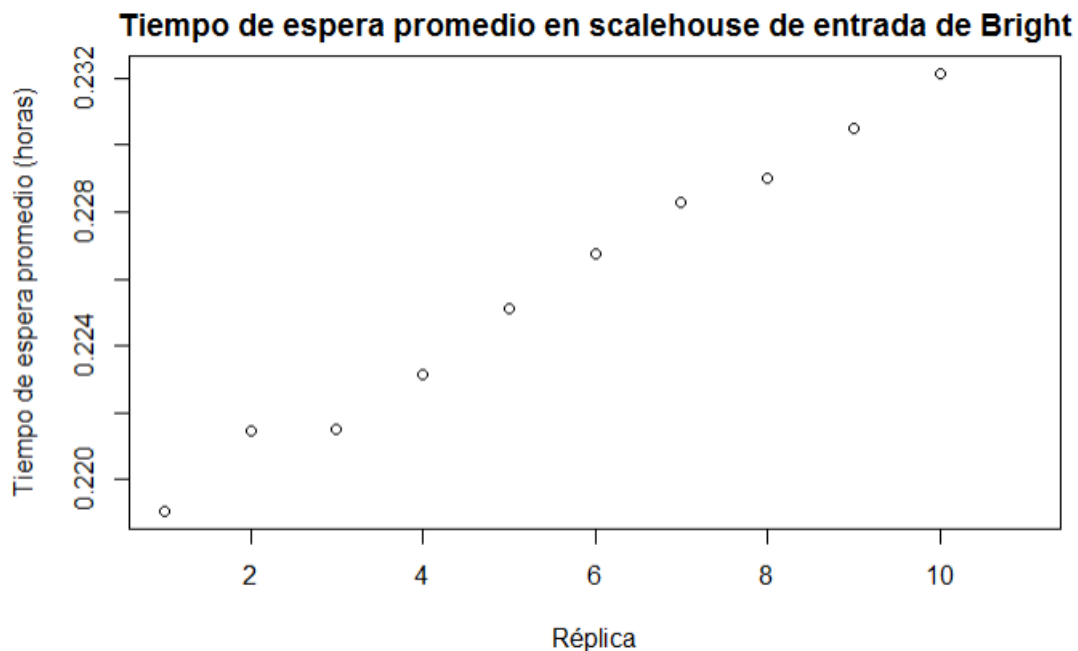


Ilustración 22: resultados de las réplicas para la simulación en tiempo de espera promedio en *scalehouse* de entrada de Bright



De donde tenemos un tiempo promedio de 0,2256965 horas, con una desviación estándar de 0,004337433. Como se está ante un conjunto de variables aleatorias, independientes e idénticamente distribuidas y se tiene un conjunto considerable de muestras, en base al Teorema del Límite Central se pueden plantear los siguientes intervalos de confianza (con un 95% de confianza).

$$[0,2225937; 0,2287993]$$

#### 4.10. Cantidad de reparaciones de grúa en cada año

En las 10 réplicas se obtuvo los siguientes datos:

Número de reparaciones de grúa									
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Réplica 5	Réplica 6	Réplica 7	Réplica 8	Réplica 9	Réplica 10
1017	1018	1018	1019	1019	1021	1021	1022	1022	1026

Tabla 18: resultados de las réplicas para la simulación en número de reparaciones de grúa

Gráficamente:

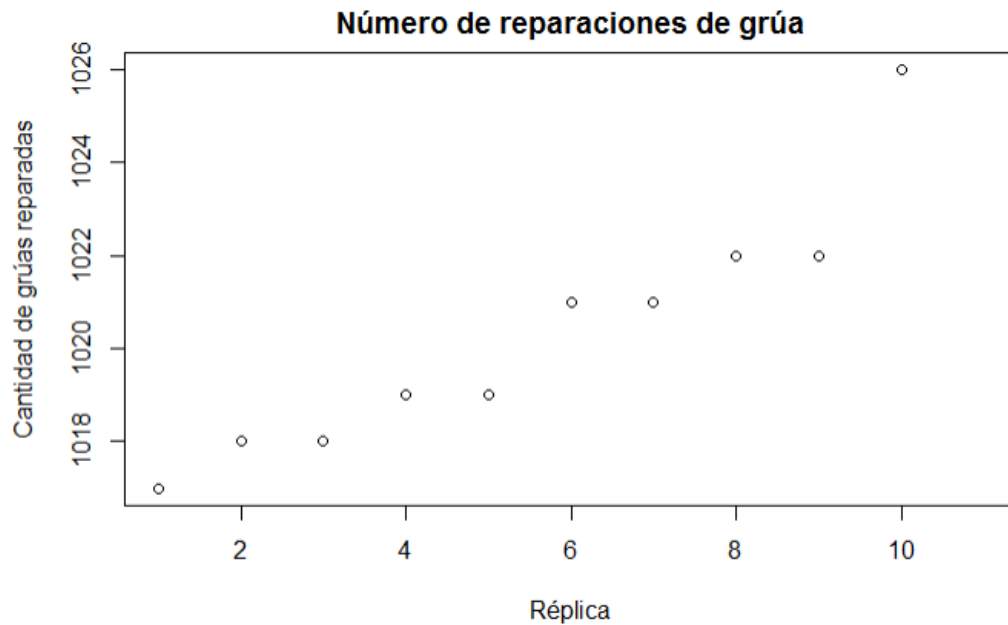


Ilustración 23: resultados de las réplicas para la simulación en número de reparaciones de grúa



De donde tenemos una cantidad promedio de 1.020,3 grúas, con una desviación estándar de 2,668749. Como se está ante un conjunto de variables aleatorias, independientes e idénticamente distribuidas y se tiene un conjunto considerable de muestras, en base al Teorema del Límite Central se pueden plantear los siguientes intervalos de confianza (con un 95% de confianza).

$$[1.018,391;1.022,209]$$

#### 4.11. Días de producción perdidos debido a *stockouts*

Para Koala en las 10 réplicas se obtuvo los siguientes datos:

Días de producción perdidos por <i>stockout</i> en Koala									
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Réplica 5	Réplica 6	Réplica 7	Réplica 8	Réplica 9	Réplica 10
4,14480991	4,23218508	4,27821122	4,7142755	4,9982032	5,6657561	5,71249759	5,85080758	6,0887947	9,86802228

Tabla 19: resultados de las réplicas para la simulación en días de producción perdidos por *stockout* en Koala

Gráficamente:

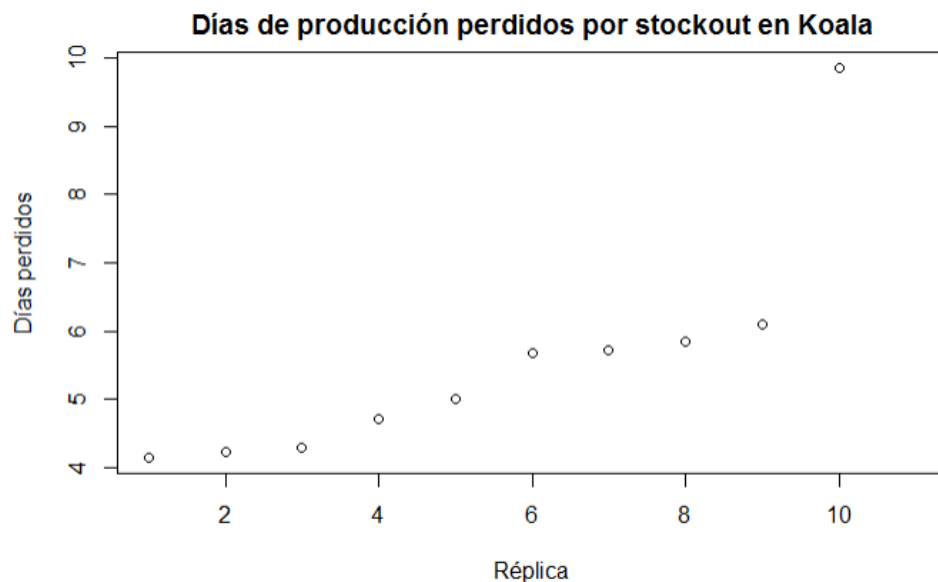


Ilustración 24: resultados de las réplicas para la simulación en días de producción perdidos por *stockout* en Koala



De donde tenemos una cantidad promedio de 5,555356 días, con una desviación estándar de 1,679854. Como se está ante un conjunto de variables aleatorias, independientes e idénticamente distribuidas y se tiene un conjunto considerable de muestras, en base al Teorema del Límite Central se pueden plantear los siguientes intervalos de confianza (con un 95% de confianza).

$$[4,353661;6,757051]$$

Para PaperTech en las 10 réplicas se obtuvo los siguientes datos:

Días de producción perdidos por stockout en PaperTech									
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Réplica 5	Réplica 6	Réplica 7	Réplica 8	Réplica 9	Réplica 10
9,01339541	9,03690913	9,39807397	9,83364875	10,1345127	10,6453535	10,7092092	10,9870313	12,0143027	15,3233394

Tabla 20: resultados de las réplicas para la simulación en días de producción perdidos por *stockout* en PaperTech

Gráficamente:

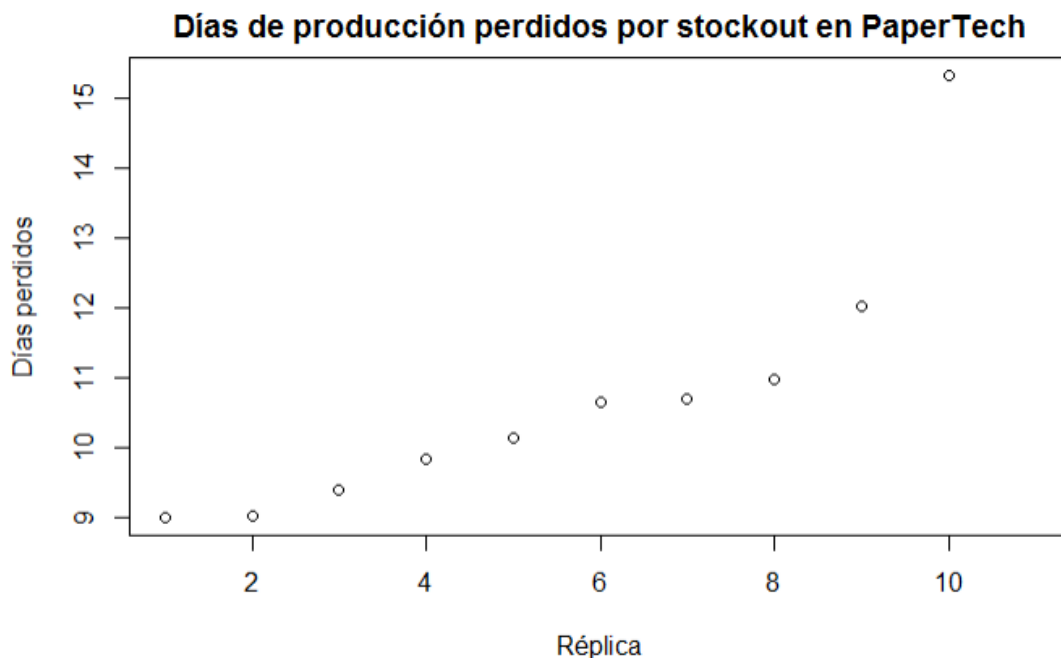


Ilustración 25: resultados de las réplicas para la simulación en días de producción perdidos por *stockout* en PaperTech



De donde tenemos una cantidad promedio de 10,70958 días, con una desviación estándar de 1,8727. Como se está ante un conjunto de variables aleatorias, independientes e idénticamente distribuidas y se tiene un conjunto considerable de muestras, en base al Teorema del Límite Central se pueden plantear los siguientes intervalos de confianza (con un 95% de confianza).

$$[9,369929;12,049227]$$

Para Bright en las 10 réplicas se obtuvo los siguientes datos:

Días de producción perdidos por stockout en Bright									
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Réplica 5	Réplica 6	Réplica 7	Réplica 8	Réplica 9	Réplica 10
64,698588	74,6408374	76,4567517	77,9925737	79,84141	83,0614238	83,6386859	85,2471948	86,2156599	94,2433036

Tabla 21: resultados de las réplicas para la simulación en días de producción perdidos por *stockout* en Bright

Gráficamente:

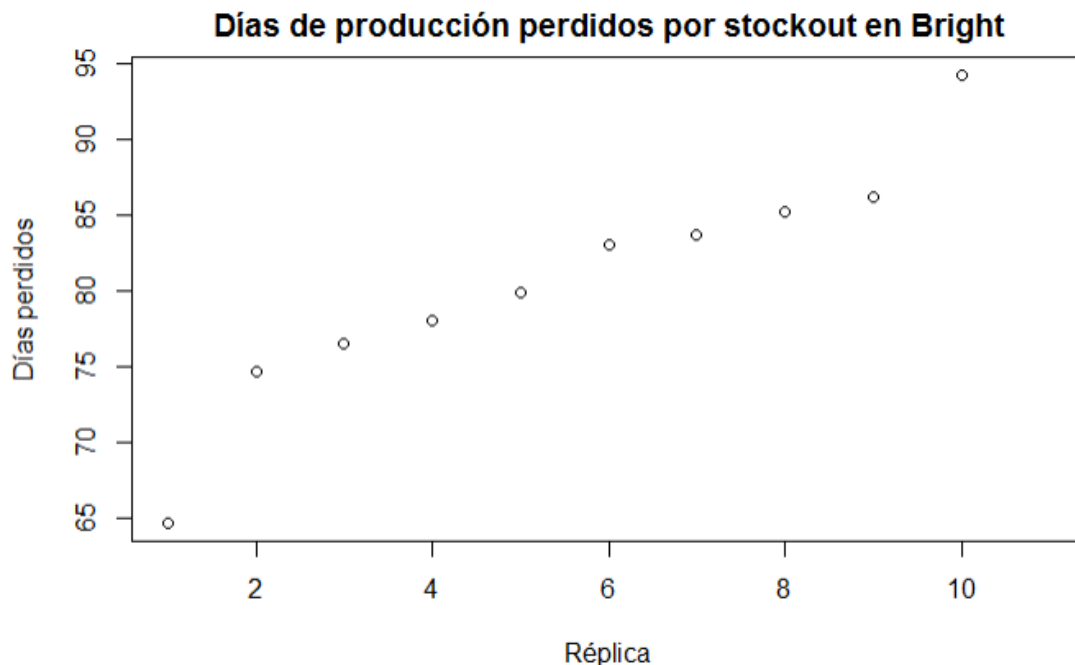


Ilustración 26: resultados de las réplicas para la simulación en días de producción perdidos por *stockout* en Bright



De donde tenemos una cantidad promedio de 80,60364 días, con una desviación estándar de 7.94055. Como se está ante un conjunto de variables aleatorias, independientes e idénticamente distribuidas y se tiene un conjunto considerable de muestras, en base al Teorema del Límite Central se pueden plantear los siguientes intervalos de confianza (con un 95% de confianza).

$$[74,92332;86,28397]$$

## 5. Conclusión

### 5.1. Razonabilidad del modelo conceptual y computacional

Para poder validar el modelo se tiene solo unos pocos datos oficiales para poder comparar. Se dice en el enunciado que los aserraderos producen en promedio 60.000 toneladas anuales de madera, según nuestro modelo llegamos a un número cercano a 48.000 toneladas anuales en promedio. La diferencia en este valor se puede deber a que le implementamos en el modelo una política de envío de camiones, lo que regula la cantidad enviada y, por eso, la cantidad producida por cada aserradero es menor.

Otra forma que tenemos de validar el modelo utilizando el criterio de *Internal Validity*, se puede ver que nuestros resultados en general poseen una muy baja varianza lo que nos confirma que el modelo es consistente y puede ser válido.

### 5.2. Principales resultados

Medida de desempeño	Promedio
Costo total de transporte (dólares)	77826960
Inventario promedio Koala (toneladas)	68924,5943
Inventario promedio PaperTech (toneladas)	45492,3927
Inventario Promedio Bright (toneladas)	23015,785
Costo total de inventario (dólares)	824596,632
Cantidad de días perdidos por clima	4,1
Número de stockouts	255,2
Cantida máxima talada (toneladas)	131124,719
Cantidad promedio talada (toneladas)	96400,3922
Tiempo de espera promedio en scalehouse de Koala (horas)	0,13220949
Tiempo de espera promedio en scalehouse de PaperTech (horas)	0,43954547
Tiempo de espera promedio en scalehouse de Bright (horas)	0,22569647
Número de reparaciones de grúa	1020,3
Cantidad de días perdidos por stockout en PaperTech	10,7095776
Cantidad de días perdidos por stockout en Bright	80,6036429
Cantidad de días perdidos por stockout en Koala	5,55535632
Costo de multas de PaperTech (dólares)	28800000
Costo de multas de Koala (dólares)	10000000
Costo de multas de Bright (dólares)	18800000

Tabla 22: principales resultados



### **5.3. Posibles nuevas políticas de operación**

Una posible política de operación es mantener un margen para no bajar de las 20.000 toneladas en cada molino, con el objetivo de no pagar la multa. Como se puede observar los costos totales de inventario son mucho menores que las multas, por lo que se debe intentar evitarlas a toda costa.

Otra política de operación consiste en planificar de antemano que los aserraderos enviarán camionadas a su máxima capacidad algunos días o meses antes de la temporada baja (Abril y Mayo). De esta forma se mantendría un inventario más elevado, pero se evitarían en parte las multas y los stock outs. Hay que considerar que el costo de inventario es insignificante en comparación al de las multas.





PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y SISTEMAS  
ICS3723 – SIMULACIÓN

## 6. Bibliografía

Estados Unidos. Departamento de Agricultura, U.S Forest Service .(2007). *Mapping Forest Resources of the United States*. Recuperado de: [https://www.fs.fed.us/rm/pubs\\_other/wo\\_gtr078\\_106\\_132.pdf](https://www.fs.fed.us/rm/pubs_other/wo_gtr078_106_132.pdf)

Estados Unidos. Departamento de Agricultura, U.S Forest Service. (2008). *Minnesota's Forests*. Recuperado de: [https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/rb/rb\\_nrs50.pdf](https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/rb/rb_nrs50.pdf)

Confederation of Paper Industries (2008). *Trees Used in Papermaking*. Recuperado de: <http://www.paper.org.uk/information/factsheets/trees.pdf>

Russell P. Kidd and Melvin Koelling, Michigan State University (1998). *Aspen Management in Michigan*. Recuperado de [http://www.michiganforesters.com/aspen\\_management\\_in.html](http://www.michiganforesters.com/aspen_management_in.html)



## 7. Anexos

Anexo 1: Código en Python para elegir al azar 1 o 2 días libres para cada aserradero (L.O.)

```
*dias_libres_aserraderos.py - C:\Users\acer\Desktop\dias_libres_aserraderos.py (3.5.2)*
File Edit Format Run Options Window Help
from random import choice, randint

archivo = open("datos_dias_libres.txt", "w")
for i in range(1,101):
    dias = ["Lunes", "Martes", "Miercoles", "Jueves", "Viernes", "Sabado"] + ["Domingo"]*3
    cuantos_dias = choice([1, 2])
    if cuantos_dias == 2:
        dia_1 = choice(dias)
        dia_2 = choice(dias)
        while dia_1 == dia_2:
            dia_2 = choice(dias)
        fila = "[{}-{}]".format(dia_1, dia_2)
    else:
        fila = "[{}]".format(choice(dias))
    archivo.write("{}-{}\n".format(i, fila))
archivo.close()
```

Ln: 16 Col: 15

Anexo 2: Archivo de texto generado por el código del anexo 1

```
datos_dias_libres.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
1-. [Domingo]
2-. [Lunes-Miercoles]
3-. [Viernes-Miercoles]
4-. [Viernes-Domingo]
5-. [Miercoles-Jueves]
6-. [Sabado]
7-. [Viernes]
8-. [Miercoles-Domingo]
9-. [Domingo]
10-. [Martes]
11-. [Viernes-Sabado]
12-. [Miercoles]
13-. [Martes-Miercoles]
14-. [Martes-Domingo]
15-. [Sabado-Domingo]
16-. [Sabado-Jueves]
```



### Anexo 3: Código en Python para asignar a cada aserradero un molino al azar

```
molinos_distribucion_aserraderos.py: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda

from random import choice, randint

molinos = ["KoalaPaper"]*30 + ["Bright"]*30 + ["PaperTech"]*40
archivo = open("datos_aserradero.txt", "w")

for i in range(1,101):
    ubicacion_molino = randint(0, len(molinos) - 1)
    fila = molinos.pop(ubicacion_molino)
    archivo.write("{}-{}\n".format(i, fila))
archivo.close()
```

### Anexo 4: Archivo de texto generado por el código de la figura 6

```
datos_aserradero.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda

1-.KoalaPaper
2-.PaperTech
3-.Bright
4-.Bright
5-.KoalaPaper
6-.KoalaPaper
7-.Bright
8-.KoalaPaper
9-.KoalaPaper
10-.Bright
11-.Bright
12-.PaperTech
13-.PaperTech
14-.KoalaPaper
```



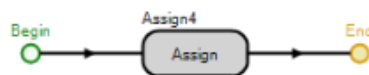
### Anexo 5: cantidad de camiones que tiene cada aserradero

Aserradero 1	Aserradero 2	Aserradero 3	Aserradero 4	Aserradero 5	Aserradero 6	Aserradero 7	Aserradero 8	Aserradero 9	Aserradero 10
4	6	4	6	4	6	6	4	4	6
Aserradero 11	Aserradero 12	Aserradero 13	Aserradero 14	Aserradero 15	Aserradero 16	Aserradero 17	Aserradero 18	Aserradero 19	Aserradero 20
6	4	6	5	4	6	4	6	4	4
Aserradero 21	Aserradero 22	Aserradero 23	Aserradero 24	Aserradero 25	Aserradero 26	Aserradero 27	Aserradero 28	Aserradero 29	Aserradero 30
6	5	5	5	4	4	6	4	6	6
Aserradero 31	Aserradero 32	Aserradero 33	Aserradero 34	Aserradero 35	Aserradero 36	Aserradero 37	Aserradero 38	Aserradero 39	Aserradero 40
5	4	5	5	4	6	5	6	5	5
Aserradero 41	Aserradero 42	Aserradero 43	Aserradero 44	Aserradero 45	Aserradero 46	Aserradero 47	Aserradero 48	Aserradero 49	Aserradero 50
5	6	6	6	4	4	4	5	4	6
Aserradero 51	Aserradero 52	Aserradero 53	Aserradero 54	Aserradero 55	Aserradero 56	Aserradero 57	Aserradero 58	Aserradero 59	Aserradero 60
4	4	6	5	6	5	6	4	6	6
Aserradero 61	Aserradero 62	Aserradero 63	Aserradero 64	Aserradero 65	Aserradero 66	Aserradero 67	Aserradero 68	Aserradero 69	Aserradero 70
6	5	4	5	4	6	5	6	6	6
Aserradero 71	Aserradero 72	Aserradero 73	Aserradero 74	Aserradero 75	Aserradero 76	Aserradero 77	Aserradero 78	Aserradero 79	Aserradero 80
4	4	5	6	6	4	5	4	4	4
Aserradero 81	Aserradero 82	Aserradero 83	Aserradero 84	Aserradero 85	Aserradero 86	Aserradero 87	Aserradero 88	Aserradero 89	Aserradero 90
4	6	6	4	5	5	5	4	5	5
Aserradero 91	Aserradero 92	Aserradero 93	Aserradero 94	Aserradero 95	Aserradero 96	Aserradero 97	Aserradero 98	Aserradero 99	Aserradero 100
5	6	4	6	5	4	5	4	6	4

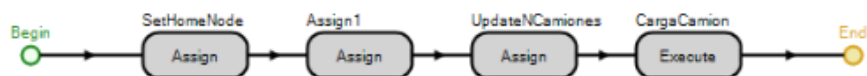
### Anexo 6: proceso de creación de camiones y carga

Se utiliza la función *CreandoCamiones*, que define el *HomeNode*, antes de que se cree la entidad, una vez creada se utiliza *CrearCamiones*, la que actualiza los contadores que permiten monitorear el cumplimiento de las restricciones a la población de camiones, y ejecuta *CargaCamion* que “genera” la madera que posee.

#### CreandoCamiones



#### CrearCamiones



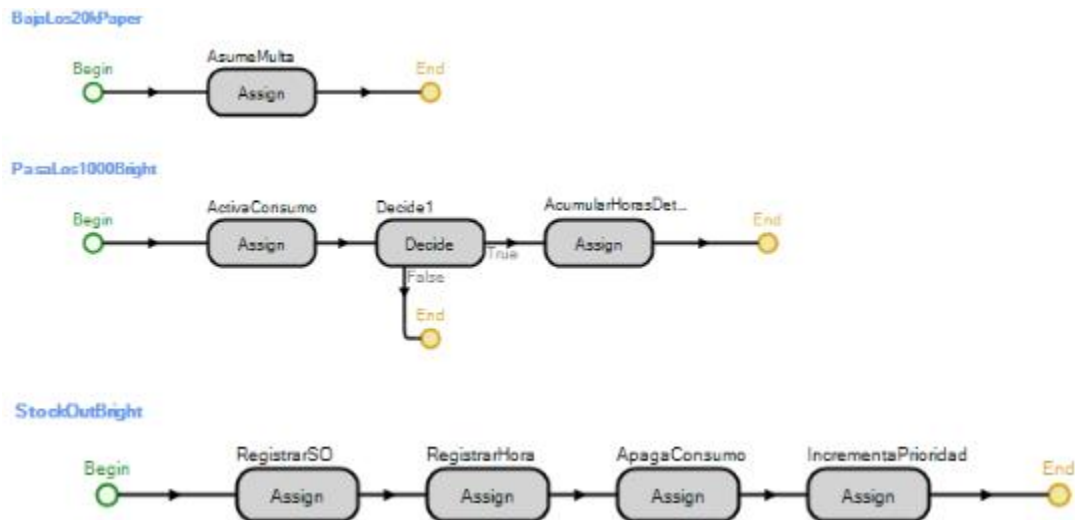
#### CargaCamiones





### Anexo 7: proceso de gestión de *stockouts*

Tenemos el proceso BajaLos20k que genera la una multa de un millón de dólares cuando se tiene menos que 20.000 toneladas en inventario en alguna papelerera. También están los procesos Stockout que para al *digester* cuando el inventario llega a cero y el proceso PasaLos1000 que reactiva el *digester* una vez que se llega a las mil toneladas en inventario nuevamente.



### Anexo 8: proceso de gestión de demanda

Tenemos que el Process2 revisa cuáles de los aserraderos están activos. Luego tenemos InicioCamionadas que elimina los aserraderos que no estén activos del proceso, por lluvias o porque tienen el día libre. Finalmente, se usa el proceso CamionadasAserradero que decide cuántas camionadas pedir a cada aserradero.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
 ESCUELA DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y SISTEMAS  
 ICS3723 – SIMULACIÓN

