

ISSN 1666-0285

TITULO: OPTIMIZACIÓN ESTOCÁSTICA: análisis de ejemplo sencillo para detectar ventajas e inconvenientes en la metodología ⁽¹⁾.

AUTORES: PENA DE LADAGA, S.; BERGER, A.

Correo electrónico: spena@agro.uba.ar y abberger@agro.uba.ar

CATEGORÍA: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN COMPLETO

EJE TEMÁTICO: 7.2. PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA. INVESTIGACIÓN OPERATIVA.

(1)- El presente trabajo fue realizado en el marco del Proyecto UBACYT 20020160100071BA. Cátedra de Administración Rural de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires.

TITULO: OPTIMIZACIÓN ESTOCÁSTICA: análisis de ejemplo sencillo para detectar ventajas e inconvenientes en la metodología ⁽¹⁾.

EJE TEMÁTICO: 7.2. PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA. INVESTIGACIÓN OPERATIVA.

RESUMEN

La optimización estocástica permitiría lograr el óptimo económico utilizando variables aleatorias. Con el objeto de analizar el método y sus resultados, se utilizó un modelo de portfolio agrícola para el partido de General Villegas donde el grupo de trabajo ha experimentado con programación lineal (PL) y con simulación Monte Carlo (SMC). Las variables aleatorias fueron rindes y precios. Se utilizó el software RiskOptimizer incluido en @Risk de Palisade. Las soluciones óptimas permitieron visualizar actividades robustas (se repiten, aunque con distinta dimensión en las soluciones). Se compararon los resultados con el fin de evaluar las tres metodologías desde el punto de vista de instrumentos para ayudar en las decisiones. En la PL determinística se interpretan todos los valiosos resultados que entrega, no sólo la integración óptima sino costos de sustitución de actividades, precio sombra de recursos y límites de validez de los indicadores. Luego se trabajó con SMC obteniéndose el resultado medio asociado a medidas de variabilidad relacionadas con el riesgo que entraña el plan óptimo determinístico, con lo cual se enriquece en gran medida la información disponible. Finalmente se analizó la optimización estocástica. Se constató que la obtención de un conjunto de mejores soluciones no es la vía adecuada para facilitar la elección de caminos muy similares entre sí. Del conjunto de salidas no se obtienen los indicadores típicos de PL; también se pierden las distribuciones de probabilidad (de masa y acumulada) de la SMC. Por tal motivo es que se realizaron “combinaciones” entre las metodologías, seleccionando diversos parámetros que se pueden maximizar o minimizar. Esos análisis arrojaron interesantes conclusiones, considerando que es necesario continuar la exploración del tema con modelos más complejos y en diversidad de combinaciones a fin de contar con conclusiones económicas que luego deberán ser evaluadas técnica y organizacionalmente ya que muchas de las soluciones no son adecuadas desde dichos puntos de vistas.

PALABRAS CLAVE: Programación lineal determinística, simulación Monte Carlo, Optimización estocástica

ABSTRACT:

Stochastic optimization would allow the economic optimum to be achieved using random variables. In order to analyze the method and its results, an agricultural portfolio model was used for the General Villegas location where the working group has experimented with linear programming (PL) and with Monte Carlo simulation (SMC). The random variables were yields and prices. RiskOptimizer software included in @Risk de Palisade was used. The optimal solutions allowed to visualize robust activities (they are repeated, although with different dimensions in the solutions). The results were compared in order to evaluate the three methodologies from the point of view of instruments to help in the decisions. In the deterministic PL, all the valuable results that are delivered are interpreted, not only the optimal integration but also the costs of replacing activities, shadow price of resources and limits of validity of the indicators. Then we worked with SMC obtaining the average result associated with measures of variability related to the risk involved in the optimal deterministic plan, which greatly enriches the available information. Finally, stochastic optimization was analyzed. It was found that obtaining a set of better solutions is not the appropriate way to facilitate the choice of paths very similar to each other. The typical PL indicators are not obtained from the set of

outputs; the probability distributions (mass and cumulative) of the SMC are also lost. For this reason, it is that “combinations” were made between the methodologies, selecting various parameters that can be maximized or minimized. These analyzes yielded interesting conclusions, considering that it is necessary to go on the exploration with more complex models and in a variety of combinations in order to have economic conclusions that should then be technically evaluated since many of the solutions are not adequate from that point of view.

KEY WORDS: deterministic linear Programming, Monte Carlo Simulation, Estocastic optimization.

El presente trabajo fue realizado en el marco de la Programación Ubacyt 2017-2019, en la Cátedra de Administración Rural de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires.

INTRODUCCIÓN

La toma de decisiones es un proceso complejo. Los investigadores buscan desde hace tiempo modos de facilitar la visión de los “posibles caminos” que el empresario podría tomar (Simon, 1960, citado en 2011). Para el cumplimiento de ese objetivo pueden utilizarse muy diversas herramientas (Chiavenatto, 2014). Ellas suelen surgir del ámbito industrial o comercial, no del agropecuario (Hazel y Norton, 1986; Winston y Allbright, 1997; Hillier y Lieberman, 2002). Los factores de riesgo que intervienen en cada uno, si bien similares en algunos casos, no lo son tanto en otros (Hardaker *et al.*, 2015; Harwood *et al.*, 1999). Por ello, es importante la exploración de metodologías para vislumbrar las ventajas y desventajas que ofrece cada una para ayudar a decidir en el ámbito agropecuario. En el presente trabajo se trabajó con un porfolio agrícola simple, no sólo por razones didácticas sino porque la construcción de los modelos es un proceso complejo que requiere de muchos cuidados y definiciones del marco en el que tiene lugar la investigación. El objetivo fue comparar los resultados obtenidos mediante el uso de PL determinística, con las salidas indicadoras de riesgo de la SMC y probar la utilidad de la optimización estocástica que combinaría ambas herramientas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El sitio de estudio:

Se trabajó con un modelo de programación lineal simple a efectos de visualizar con mayor facilidad las diferencias entre los planes óptimos determinístico y estocástico; el mismo deriva de una matriz compleja que puede consultarse para mayores detalles (Pena de Ladaga *et al.*, 2015; Marra *et al.*, 2016). Resumidamente puede decirse que se trata de un campo representativo de la zona oeste de Pampa Arenosa, en el partido de Gral. Villegas de la provincia de Buenos Aires. Las condiciones climáticas de la zona son semi-áridas a sub-húmedas y templadas a frías con temperaturas promedio anuales que rondan los 16 a 17°C. El partido se extiende sobre un territorio llano, compuesto por depósitos eólicos arenosos provenientes del material loésico de edad cordobesa, que conforman un perfil típico limo arenoso, permeable y fértil (orden de los Hapludoles y algunos Haplustoles), exceptuando ciertas zonas en las que existen lagunas. Son establecimientos en los que los suelos presentan cierta fragilidad, por lo que antes de la expansión sojera eran fundamentalmente ganaderos y en la actualidad vienen soportando una importante presión agrícola. La distribución de precipitaciones en la región es el régimen primavero-estivo-otoñal con un nivel promedio histórico de 750 mm anuales, incrementado en forma importante desde hace aproximadamente 30 años, con mediciones superiores a los 950 mm anuales. Es quizás este hecho el que motivó el avance de superficie dedicada a cultivos agrícolas, al permitir lograr muy buenos rendimientos. Las superficies ocupadas muestran que no sólo ha habido uso agrícola sustitutivo, sino que se han incorporado tierras ganaderas a la siembra de soja. Este hecho cuenta con el apoyo del sólido sustento tecnológico de la siembra directa: el típico sistema productivo mixto ganadero de carne-agrícola que caracterizó a la zona por un largo período y en el que convivía el engorde de novillos en rotación con agricultura fue siendo reemplazado por incrementos en las superficies de cultivos agrícolas.

El modelo agrícola:

A los efectos de la presente investigación, se tomó un módulo de 1.000 ha a fin de facilitar la comprensión y extrapolación de resultados. El modelo no incluye el costo de arrendamiento, por lo que se trataría del caso de un productor propietario.

Los distintos sectores del campo están separados en 6 ambientes principales con características propias y distinta aptitud productiva:

Lomas: 509 hectáreas (50,9%); ocupan la mayor parte del módulo seleccionado, acorde a establecimientos típicos. Los suelos son hapludoles típicos, con textura franco-arenosa, como todo el campo, profundos, bien drenados y moderadamente provistos de materia orgánica. Clasificación por capacidad de uso: clase I, aptos para la realización de pasturas consociadas en base de alfalfa o verdeos estacionales para hacienda y para la realización de cultivos de cosecha. Los cultivos más comunes son trigo, maíz, soja de primera y de segunda siembra y girasol. La siembra directa en la región Oeste constituye el sistema por excelencia. Estos suelos se consideran a los efectos del modelo aptos para el desarrollo de agricultura continua, es decir sin restricción alguna al uso exclusivo para agricultura.

Planos Altos: 307 hectáreas (30,7%); se localizan en el campo en forma discontinua. Los suelos son hapludoles thapto árgicos, profundos a medianamente profundos, de textura franco-arenosa, bien a moderadamente drenados, y con buena a mediana provisión de materia orgánica. Presentan productividad similar a la del primer ambiente, aunque en años de exceso hídrico suelen experimentar saturación del perfil, falta de piso y encharcamientos menores, que resultan en menores rindes y dificultades para la recolección y traslado de las cosechas. Clasificación por capacidad de uso: clase III. La rotación técnicamente recomendada (no incluida en el modelo) es de 4 años de agricultura y 4 de ganadería, siendo los rindes más bajos que en el suelo anterior. **Planos Bajos:** 87 hectáreas (8,7%) se distribuyen en el centro del campo. Ocupan una posición inferior en el relieve respecto a los planos altos, con suelos similares, pero con drenaje más moderado. Clase de capacidad de uso: VI. Sufren saturación del perfil y consecuente encharcamiento en épocas de excesos hídricos y son destinados comúnmente a campo natural. Este recurso forrajero tiene una productividad aceptable; se supone necesaria la desmalezada anual para mantener la calidad. Puede eventualmente ser mejorada con ciertas especies a fin de soportar un incremento de carga animal, opción contemplada en el modelo.

Tendidos: 60 hectáreas (6%) se encuentran rodeando lagunas temporarias. Son áreas cóncavas, con suelos de drenaje lento a dificultoso. Reciben las aguas de escurrimiento de las partes de más nivel y tienden a permanecer encharcados durante períodos prolongados. Clase de capacidad de uso VII. Sólo destinados a campo natural bajo, también una desmalezada anual. En el modelo se considera su uso ganadero junto a los planos bajos totalizando 147 ha.

Lagunas: 37 hectáreas (3,7%) se distribuyen por el establecimiento. Clase de capacidad de uso VIII. No se incluyen en el modelo dado que no puede realizarse ninguna actividad sobre las mismas.

Actividades y restricciones: En esta primera fase de la investigación metodológica, con el objetivo de facilitar la interpretación de resultados, se incluyeron sólo actividades agrícolas: trigo (T), soja de primera (S1) y segunda siembra (S2), maíz (M) y girasol (G), distinguiendo rindes entre lomas (509 ha) y planos altos (307 ha) solamente; en ambos casos se consideraron dos períodos de ocupación de la tierra a fin de que el modelo pudiera seleccionar “un” cultivo en particular, o, si era más favorable, una posible combinación del tipo trigo / soja de segunda siembra, o trigo / girasol.

En todos los casos se supuso el empleo de siembra directa con contenido adecuado de agua a la siembra y valores medios de nutrientes. En el resto de los suelos fundamentalmente ganaderos (147 ha), se modelizó una única actividad ganadera (sin alternativas de elección) a la que se le calculó un margen bruto determinístico.

Los costos de insumos corresponden a la campaña 2017/2018 y fueron extraídos de la revista Márgenes Agropecuarios al momento de la siembra de cada cultivo, siendo ajustados por la

opinión de expertos. Se trabajó en dólares constantes para evitar el uso de índices con series dudosas y/o incompletas.

Se consideró que las variables de mayor incidencia en el resultado son los rendimientos y los precios. Los primeros dependen de las condiciones del sitio de cultivo, el planteo técnico aplicado y se ven afectados por las condiciones meteorológicas. Las series históricas de rindes bajo tecnología constante pueden ser tomadas como un buen estimador de lo que sucederá en el futuro en esta variable (Boussard, 2015). En el modelo los rindes fueron extraídos de la base de datos RindEs, construida por Cultivar Conocimiento Agropecuario en convenio con AACREA (2018) para trigo, soja de primera y segunda siembra y maíz. En el caso de girasol, no contemplado en dicha base de datos, la información se obtuvo de expertos de la zona. Las distribuciones generadas por RindEs son por ambiente a escala de lote. Es decir que son para superficies acotadas (20-50 ha) de suelo homogéneo. Con el fin de considerar la variabilidad de rinde para un conjunto de lotes (todos los lotes de un campo, con suelos similares y el mismo planteo técnico), donde la variabilidad total sería algo menor a la estimada por RindEs para un solo lote, se decidió extraer los valores de los percentiles de 5% y 95% utilizados como valores mínimos y máximos respectivamente (Cultivaragro, 2019). Los mismos se observan en el Cuadro 1 para el caso de los suelos de loma, y en el Cuadro 2 para la situación de plano alto.

Cuadro 1: Parámetros de distribución de rindes de cultivos ambiente loma

RINDE (TN/HA)	T	S1	S2	M	G
MINIMO	2,815	1,882	1,694	2,235	0,6
MAS PROBABLE	4,492	3,498	3,523	7,972	1,6
MAXIMO	5,759	5,605	4,369	9,679	2,5
Esperado	4,42	3,58	3,36	7,30	1,58

T: trigo, S1: soja de primera, S2: soja de segunda, M: maíz, G: girasol

Fuente: RindEs (Cultivar Conocimiento Agropecuario. Gral. Villegas)

Cuadro 2: Parámetros de distribución de rindes de cultivos ambiente plano alto.

RINDE (TN/HA)	T	S1	S2	M	G
MINIMO	0,94	1,763	1,349	0,292	0,51
MAS PROBABLE	3,559	3,612	3,17	7,503	1,36
MAXIMO	5,441	5,194	4,276	9,313	2,125
Esperado	3,44	3,57	3,05	6,60	1,35

T: trigo, S1: soja de primera, S2: soja de segunda, M: maíz, G: girasol

Fuente: RindEs (Cultivar Conocimiento Agropecuario. Gral. Villegas)

Para la simulación Monte Carlo y la optimización estocástica, ambas variables fueron modelizadas con distribuciones Betapert, definidas mediante mínimo, máximo y valor más probable. Como es sabido, la distribución Betapert enfatiza el peso de los valores más probables con respecto a los valores extremos; es así como el valor esperado es igual a $(\text{mínimo} + 4 \cdot \text{valor más probable} + \text{máximo})/6$, (Pena de Ladaga y Berger, 2006). Para el caso de la optimización determinística, los márgenes brutos de cada cultivo se calcularon con los valores esperados.

Respecto a los precios, al ser dependientes de los valores internacionales que, a su vez, están influenciados por múltiples factores (Boussard, 2015), se trabajó partiendo de series históricas

de 12 años (campañas 2007/08 a 2018/19) en dólares estadounidenses constantes a mayo de 2019, previamente homogeneizados respecto a las retenciones y /o derechos de exportación (Cuadro 3). A estos valores se le aplicaron los impuestos vigentes a mayo de 2019 (28% en soja, y 10% en girasol, maíz y trigo). De igual modo que en el caso de los rendimientos, se utilizaron los valores esperados para la optimización determinística y se modelizó el riesgo a través del uso de la distribución Betapert.

Cuadro 3: Precios de commodities en dólares constantes a mayo de 2019

PRECIO (u\$s/TN)	T	S1	S2	M	G
MINIMO	150,13	284,16		132,67	278,67
MAS PROBABLE	212,79	408,19		184,85	385,53
MAXIMO	339,97	514,11		254,36	502,75
Esperado	223,54	405,17		187,74	387,26

T: trigo, S1: soja de primera, S2: soja de segunda, M: maíz, G: girasol

Fuente: Elaboración propia.

Tanto en el caso de la simulación Monte Carlo (SMC) como de la optimización estocástica se incluyeron las correlaciones tanto entre rindes (Cuadro 4) como entre precios de cultivos (cuadro 5).

Cuadro 4: Coeficientes de correlación de Spearman entre rindes y tipos de suelo

		T	S1	S2	M	G	T	S1	S2	M	G
		LOMA	LOMA	LOMA	LOMA	LOMA	P. ALTO	P. ALTO	P. ALTO	P. ALTO	P. ALTO
T	LOMA	1	-0,04	-0,28	0,22		0,97	-0,1	-0,2	0,28	
S1	LOMA		1	0,7	0,81	0,5	-0,05	0,91	0,7	0,77	
S2	LOMA			1	0,32	0,3	-0,3	0,86	0,99	0,29	
M	LOMA				1	0,3	0,21	0,66	0,33	0,98	
G	LOMA					1					
T	PLANO ALTO						1	-0,11	-0,2	0,25	0,5
S1	PLANO ALTO							1	0,86	0,61	0,3
S2	PLANO ALTO								1	0,3	0,3
M	PLANO ALTO									1	
G	PLANO ALTO										1

T: trigo, S1: soja de primera, S2: soja de segunda, M: maíz, G: girasol

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 5: Correlaciones de precios de cultivos

	T	S1	M	G
T	1	0,5	0,76	0,37
S1		1	0,66	0,77
M			1	0,62
G				1

T: trigo, S: soja, M: maíz, G: girasol

Fuente: Elaboración propia.

La resolución de PL determinística se llevó a cabo mediante Solver de Frontline Systems, la SMC a través de @Risk y la optimización estocástica con RiskOptimizer, ambos de Palisade Corporation.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El portfolio fue trabajado primeramente con Programación Lineal determinística, utilizando los valores medios para las variables aleatorias de mayor trascendencia en el resultado. Se comentan en detalle los costos de sustitución de las actividades, los de oportunidad de los recursos y los límites dentro de los cuales son válidos dichos resultados. Se intenta resumir aquella información que puede transmitirse con claridad al tomador de decisiones a fin de ayudarlo en su proceso. A continuación, se aplica a la integración de máximo beneficio el método de simulación Monte Carlo, obteniendo la distribución acumulada de resultados, las estadísticas varias de la misma entre las que figuran los percentiles que asocian cada resultado a un nivel de probabilidad de ocurrencia (Berger y Pena de Ladaga, 2016). Finalmente, el mismo modelo es trabajado con optimización estocástica. Ésta trabaja con los denominados algoritmos genéticos que identifican el “conjunto de mejores soluciones”. Ellos pueden ordenarse acorde al resultado medio, o incluir otros parámetros de riesgo de interés como el desvío estándar, valores mínimos, coeficiente de variación, etc. (Vose, 2008; Machain, 2011). Se compara la información que surge de cada una de las herramientas.

1- Resultados de la optimización determinística

La optimización tradicional determinística del modelo de programación lineal llevó al resultado que, debido a su simplicidad, podía predecirse simplemente mirando las cifras de los márgenes brutos: el doble cultivo trigo seguido de soja de segunda siembra es la actividad más conveniente, tanto en las tierras de loma como en las de plano alto. En el suelo ganadero aparece la única alternativa factible que se modelizó. El MBT de la solución óptima arrojó un valor de 635.772 dólares. La integración de máximo beneficio consiste en realizar en la loma, la totalidad (509 ha) del doble cultivo trigo/soja de segunda siembra; lo propio ocurre con las 307 ha del suelo de plano alto. Por tanto, las actividades T/S2 de loma y T/S2 de plano alto, no tienen costo de sustitución. Sus márgenes brutos (MB/ha) de 303 y 523 dólares/ha hacen una rotación de 825 dólares/ha para el primer caso y los 143 y 463 conforman un MB/ha de 606 dólares/ha en el plano alto. En el sistema planteado, constituyen la combinación de actividades que paga los recursos que utilizan al costo de oportunidad interno que surge del sistema modelizado.

Todos los tipos de tierra, en los dos períodos considerados en la agricultura así como la tierra ganadera resultaron limitantes; existen diferencias en cuanto a los precios sombra por período y tipo de suelo, dado que en ese costo de oportunidad se refleja la capacidad productiva del tipo de recurso, influenciada por la competencia entre alternativas. Es así como el suelo de loma tiene un valor de 303 dólares en el primer período y de 522 en el segundo, totalizando “por ha de doble cultivo” un precio sombra en la loma de 825 dólares/ha. En el caso del plano alto ocurre algo similar, con 143 dólares en el período 1 y 463 en el período 2, totalizando 606 dólares/ha. Finalmente, la tierra ganadera, tiene un precio sombra equivalente al MB/ha de la única actividad factible, es decir de 200 dólares/ha.

Los valores mencionados son interesantes respecto a la posibilidad de arrendamiento, bien sea para dar las tierras en arrendamiento como para conseguir mayor superficie y pagar por ella. En relación con los límites de validez de la solución, las pocas interacciones entre variables indican que, con las ha consideradas, las cifras de costo de oportunidad son lineales desde cero hasta

infinito en todos los casos. Por tanto, es sencillo el cálculo de los arrendamientos que pueden pagarse por las distintas calidades de campo. Esto no es frecuente que ocurra; por lo común la integración óptima tiene límites entre rangos, siendo importante prestar atención a la interpretación de las cifras.

En relación con las actividades que no han ingresado en la solución, ellas presentan costo de sustitución; el mismo se interpreta como lo que se dejaría de ganar si se obliga a realizar una ha de un cultivo que no está en la solución óptima o, del mismo modo, cuánto debería aumentar el MB/ha de dicho cultivo para que sea conveniente el ingreso en la solución. Estos valores también tienen la característica de ser marginales (como los costos de oportunidad) y por tanto deben considerarse los límites de validez. Constituyen una herramienta útil para evaluar la estabilidad de la solución óptima. Por ejemplo, en el modelo utilizado en la loma, la soja de primera siembra debería aumentar su MB en 335 dólares/ha. Si se compara con el coeficiente objetivo de 490 dólares/ha es muy difícil que el margen pueda elevarse, sea por mayor rinde, mayor precio o ambas situaciones en modo simultáneo un porcentaje de más del 68%; los límites indican que si aumentara esos 335 dólares/ha (es decir llegara a 825 dólares/ha), la solución óptima cambiaría. En el caso del maíz, el costo de sustitución es de 485 dólares/ha (considerando que el coeficiente objetivo es de 341); para el girasol el valor es de 648 dólares/ha, contra los 177 de MB medio: todas situaciones de difícil ocurrencia, lo que generan estabilidad a la solución.

En el caso del plano alto los valores son algo más inestables: bajan a 37 dólares/ha para soja de primera, constituyendo una posible opción considerando el MB/ha de 569 dólares; el costo de sustitución del maíz es de 246 sobre los 359 de MB/ha y en el caso de girasol la cifra es sumamente elevada: 503 dólares/ha versus los 103 de su coeficiente objetivo. Toda la información que se ha comentado (costos de sustitución, oportunidad y límites de validez) es de carácter marginal. Su valor es muy grande si se la interpreta adecuadamente, pues permite dar solidez a una selección de plan a desarrollar.

2- Resultados de la simulación Monte Carlo

En el caso de la simulación Monte Carlo, al no ser un método de optimización, no vuelca la integración de máximo beneficio sino que, las superficies deben ser previamente prefijadas. En este caso, los resultados de superficie surgidos del modelo óptimo son ingresados en un modelo que permite analizar la variabilidad a la que el productor se enfrenta al llevar a la práctica el sistema que la optimización sugiere (Berger y Pena de Ladaga, 2016). Se trabajó con las distribuciones de probabilidad ya mencionadas con en 5.000 iteraciones. Así se obtuvo el histograma de margen bruto total (MBT, Figura 1) y la curva de distribución acumulada ascendente (Figura 2). Puede verse que el mínimo resultado de MBT es de 171.837 dólares y el máximo de 1.362.371. La media concuerda con los resultados de la optimización determinística. El resultado está acompañado por un desvío estándar de 174.298 dólares; en el gráfico están marcados también los percentiles de 5% (365.000 dólares) y el de 95% (936.000 dólares).

Figura 1: Histograma del MBT

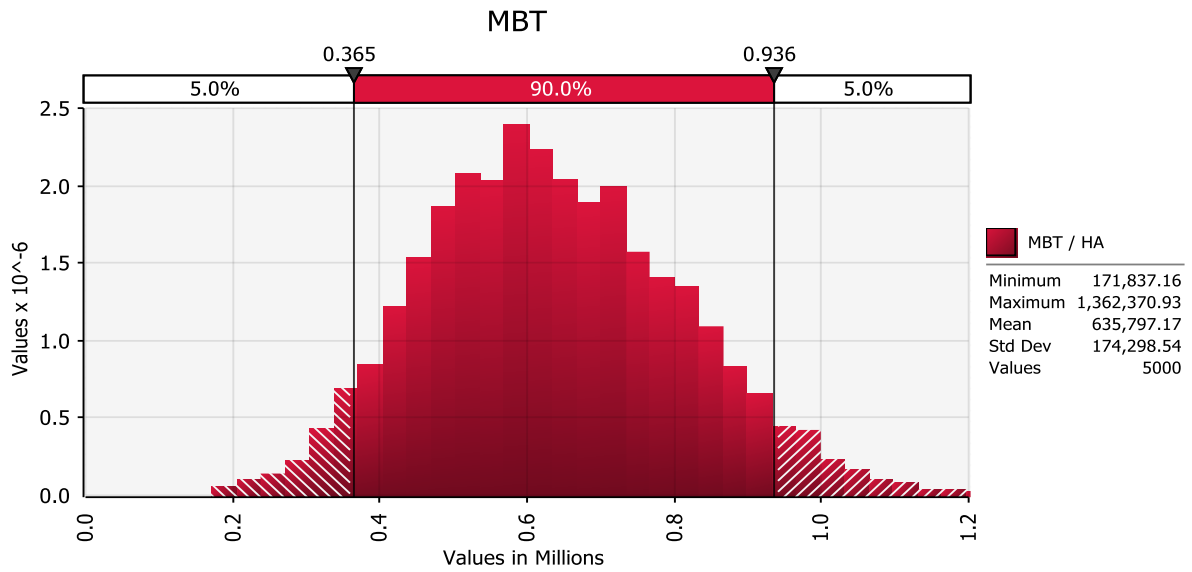
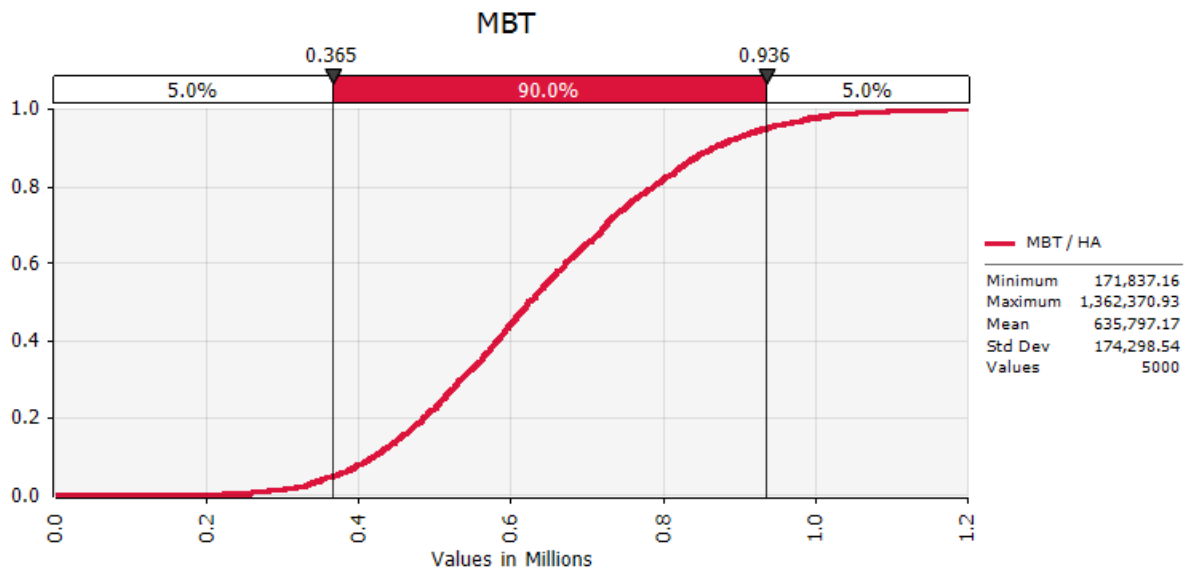


Figura 2: Distribución acumulada de MBT.



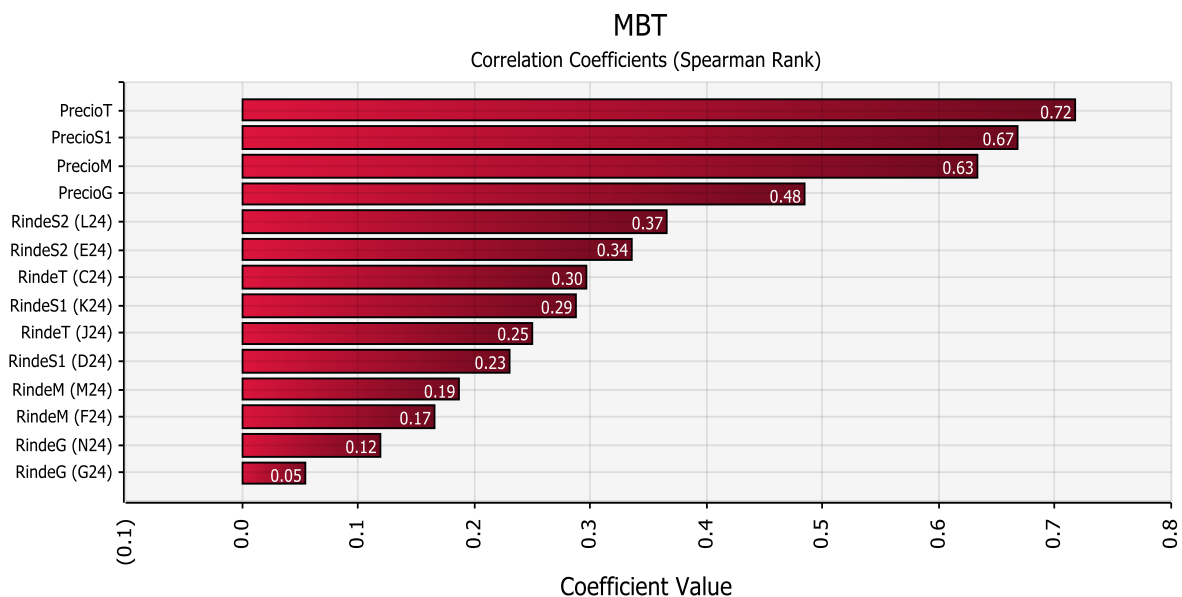
A continuación, se resumen las estadísticas básicas y percentiles (Cuadro 6). Cabe destacar que con ellos pueden identificarse probabilidades de otros valores de interés como la probabilidad de pérdida, en este caso nula, así como el costo del capital operativo, los costos indirectos, algún costo fijo, obligaciones preexistentes a atender, etc..

Cuadro 6: Estadísticas básicas y percentiles asociados a MBT

Summary Statistics for MBT / HA			
Statistics		Percentile	
Minimum	171.837,16	5%	365.371,05
Maximum	1.362.370,93	10%	417.280,23
Mean	635.797,17	15%	454.516,23
Std Dev	174.298,54	20%	484.186,41
Variance	30379980806	25%	509.996,59
Skewness	0,269163537	30%	533.473,70
Kurtosis	2,867661177	35%	559.762,34
Median	622.949,46	40%	581.063,98
Mode	596.054,82	45%	601.674,55
Left X	365.371,05	50%	622.949,46
Left P	5%	55%	646.694,69
Right X	935.512,48	60%	671.867,50
Right P	95%	65%	698.534,33
Diff X	570.141,44	70%	725.424,46
Diff P	90%	75%	752.295,58
#Errors	0	80%	787.422,31
Filter Min	Off	85%	823.827,87
Filter Max	Off	90%	867.261,09
#Filtered	0	95%	935.512,48

El método también permite analizar, a través del gráfico tornado, la correlación de Spearman entre cada una de las variables intervinientes y el MBT (Figura 3). Se observa en él que en la determinación del MBT es de mucho mayor peso el factor precio que los rendimientos.

Figura 3: Gráfico tornado con coeficientes de correlación de Spearman



3- Resultados de la optimización estocástica

El desarrollo de los algoritmos “genéticos” (inspirados en los principios darwinianos que sostienen que la selección natural hace que en un ambiente sobrevivan los más aptos) posibilitó

la conjunción de las dos técnicas antes analizadas. En este caso el modelo se construyó con las mismas restricciones de suelo y períodos de utilización vistos en la PL, todas ellas consideradas “duras” es decir que necesariamente deben cumplirse. Las variables aleatorias fueron nuevamente rinde y precio, y se trabajó con 1.000 iteraciones en cada caso analizado.

La ventaja que se apreció en RiskOptimizer es que trabaja sobre un archivo de Excel similar al que se utiliza con el Solver, y su uso es sencillo si ya se manejan las dos herramientas presentadas (PL y SMC). El motor de cálculo con que cuenta el programa para resolver los algoritmos genéticos es el Evolver desarrollado por Palisade Corporation.

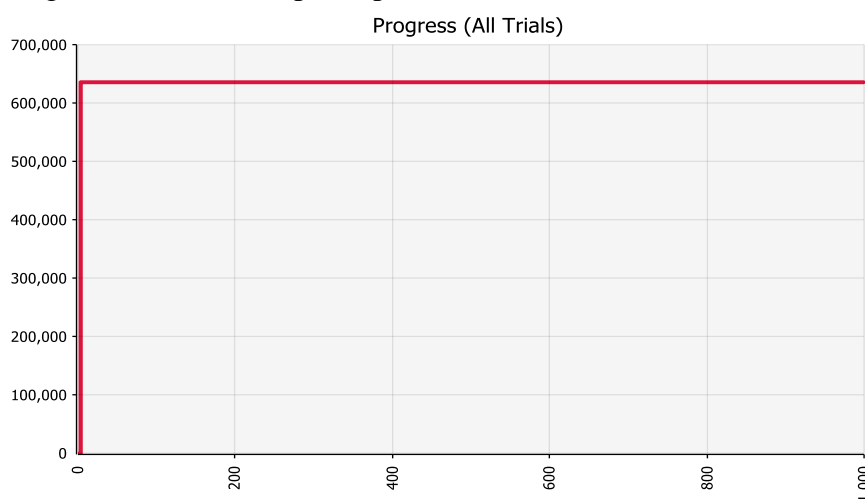
Se deben definir las celdas ajustables y, según el tipo de problema a resolver, será el método de solución que deba seleccionarse. En este caso en que las variables ajustables cambian en forma independiente se recomienda el uso de la opción “Recipe”.

El progreso iterativo se puede seguir en pantalla. Así, cada nueva solución que cumple con las restricciones duras sólo es conservada si mejora los valores del criterio objetivo. La búsqueda evoluciona hacia una “población de soluciones”: como si en la computadora se efectuaran cientos o miles de análisis del tipo “qué pasa si” todo en una vez. Según el software que se utilice, el programa funciona hasta tanto se cumpla la cantidad de iteraciones máxima pre - establecida, o puede detenerse automáticamente cuando el conjunto de soluciones óptimas converge hacia estadísticos estables.

En un primer paso se procedió a la maximización del valor medio trabajando con muestreo Latin Hipercube y seleccionando semilla “random” con el fin de arribar a una solución óptima robusta (como Palisade sugiere) que cumpla con las restricciones “duras” indicadas. El valor obtenido fue idéntico al visto, tanto con el uso del Solver determinístico, como con la SMC de @Risk, es decir un MBT de 635.796 dólares con un desvío standard de 174.299 dólares y un valor mínimo de 171.837 dólares. La integración empresaria del MBT medio fue también de las 509 ha de T / S2 en suelo de loma y 307 en el plano alto, acompañadas por las 147 ha de ganadería.

La pantalla que muestra RiskOptimizer indicando el progreso de las iteraciones es la que puede verse en la Figura 4.

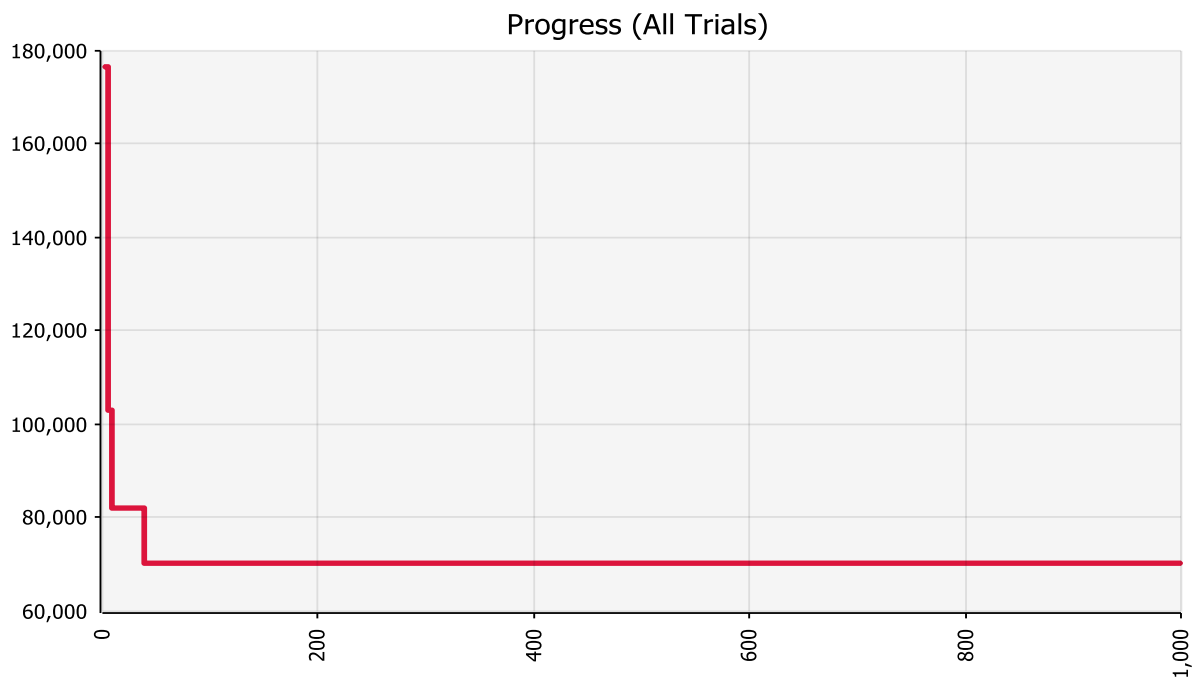
Figura 4: Progreso del muestreo para optimización estocástica de la media del MBT.



A continuación, se procedió a evaluar la solución que minimiza el desvío standard. La Figura 5 muestra el progreso de las 1.000 iteraciones para, partiendo del valor original de 176.758

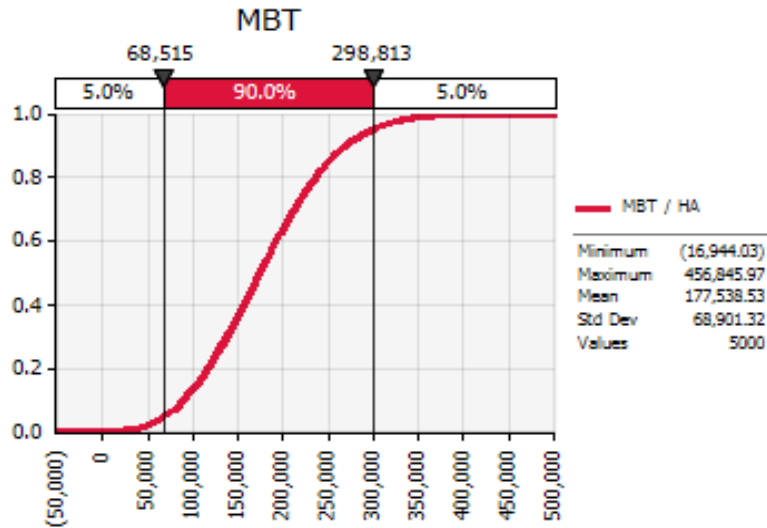
dólares originales de desvío standard de la optimización de la media terminó en un valor de 70.380 dólares. Pero para lograr eso hay considerables modificaciones en la integración empresarial (evidentemente selecciona las actividades más “constantes” en su MB/ha), utilizando la totalidad de los recursos. El plan de menor desvío standard (Desvío 0) sería “no hacer nada”, pero eso no es una solución que un productor empresario vaya a realizar. El óptimo que la salida de RiskOptimizer indica es en la loma hacer solo 37,7 ha de la rotación T / S2, y hace 0.25 ha de M y 471 ha de G -evidentemente el cultivo más estable-; en el caso del suelo de plano alto, hace 301 ha de G y 6 de maíz; en las 147 ha de ganadería, lleva a cabo dicha actividad.

Figura 5: Progreso de las iteraciones en minimización de desvío standard



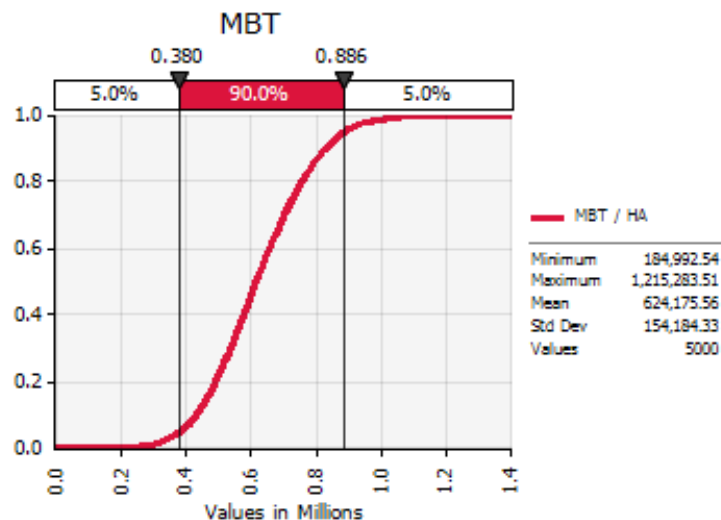
Llevados los resultados a SMC, el MBT medio es de sólo 177.498 dólares, con un mínimo de -16.944 y un máximo de 456.846. Se incluye la Figura 6.

Figura 6: Distribución acumulada de MBT para minimización de desvío standard.



Se procedió entonces a aplicar el “criterio “Minimax”, es decir buscar la maximización de los valores mínimos. En este caso la integración empresaria consiste en llevar a cabo en la loma las 509 ha de la rotación T / S2, mientras que, en el plano alto, las 307 ha son destinadas a S1 (recordar que el costo de sustitución de la matriz determinística indicaba la inestabilidad); como siempre, al ser resultado determinístico fijo, las 147 ha son ocupadas con la ganadería. Al analizar esta integración con SMC, los resultados fueron interesantes (Figura 7).

Figura 7: Distribución acumulada de MBT para la integración del Máximo de los mínimos



Sólo hay un cambio en las tierras de plano alto en lo que respecta a la integración de actividades. Esta solución presenta un MBT bastante cercano a la de optimización determinística, bajando a 624.175 dólares (apenas una diferencia de 11.622 dólares menos) acompañado por un desvío de 154.184 dólares (20.114 dólares inferior al del óptimo determinístico); por tal motivo, podría ser una opción a seleccionar por productores con aversión al riesgo.

Con el fin de resumir la información comentada, se incluyen los Cuadros 7 y 8, con la integración empresarial de los tres planes explorados y comentados en el presente trabajo.

Cuadro 7: Integración del plan óptimo en base a tres objetivos diferentes (hectáreas de cada actividad)

	Loma						Plano alto				
	T	S1	S2	M	G	Ganadería	T	S1	S2	M	G
Máx MBT	509.0	-	509.0	-	-	147.0	307.0	-	307.0	-	-
Mín desvío	37.7	-	37.7	0.3	471.1	147.0	-	-	-	6.0	301.0
Máx mínimo	509.0	-	509.0	-	-	147.0	-	307.0	-	-	-

Cuadro 8: Resultado (MBT) en base a tres objetivos diferentes (hectáreas de cada actividad)

	MBT		
	Media	Desvío	Mínimo
Máx MBT	635.772	174.299	171.837
Mín desvío	177.498	68.901	-16.944
Máx mínimo	624.266	154.184	184.993

CONCLUSIONES:

La utilidad de la herramienta de PL en el sector agropecuario en modelos complejos ha sido ampliamente demostrada en numerosas investigaciones. La interpretación de las salidas que ofrece no es sencilla, pero la complejidad se ve más que compensada por la utilidad que tiene cada uno de los indicadores. La visión del factor riesgo en los modelos tradicionales puede hacerse parcialmente a través de la interpretación de las salidas mencionadas, aunque suele ser difícil la transmisión de conceptos al decisor que debería utilizarlos.

En el caso de la SMC, los gráficos y los valores porcentuales de un planteo técnico determinado son muy amigables, dando respuesta a preguntas muy frecuentes como ¿cuántos años puedo esperar que los resultados cubran ciertas expectativas de ingresos?. Utilizando valores definidos, como el nivel de retiros, los costos fijos, la inversión operativa, etc., es un buen complemento para el método anterior.

La optimización estocástica a priori se presentó como atractiva; no se encontraron sin embargo ejemplos de trabajos que la utilicen en investigación. La imposibilidad de contar con la información usual de costos de oportunidad y sustitución y límites de validez opacaron en principio sus virtudes. Pero la exploración de distintas opciones combinadas entre las metodologías la transformó en un interesante desafío para problemas más complejos. Es necesario para esto contar con buen conocimiento de los métodos por lo que, a nivel de asesor y de investigación, la herramienta puede considerarse una buena opción a contemplar.

En todos los casos debe destacarse que las integraciones obtenidas con información económica deben ser evaluadas desde el punto de vista técnico y también organizacional, por lo cual la combinación de herramientas debería estar en manos de asesores capacitados para resumir los tres focos mencionados.

BIBLIOGRAFÍA:

Berger, A.; Pena de Ladaga, S. (2016). Decisiones riesgosas en el sector agropecuario: Simulación Monte Carlo como herramienta para el productor y el asesor. Editorial Orientación Gráfica Editora. 2da. Edición corregida y aumentada. 128 p.

Boussard, J.M. (2015). El riesgo en las decisiones de la producción agropecuaria: aspectos microeconómicos. En Notas sobre economía de la agricultura y las empresas agropecuarias y agroindustriales. Editora: C. Vicién. Editorial Orientación Gráfica Editora. 15-56.

Chiavenato, I. (2004). Introducción a la teoría general de la administración. Séptima ed. Ed. Mc Graw-Hill Iberoamericana. 562 p.

Cultivar Conocimiento Agropecuario S.A. (2019). www.cultivaragro.com.ar/rindes

- Hardaker, J.; Huirne, R.; Anderson, J. (2015). Coping with risk in agriculture. [Researchgate.net/profile/Jock_Anderson/publication/26446444532](https://www.researchgate.net/profile/Jock_Anderson/publication/26446444532).

- Hazell, P; Norton, R. (1986). Mathematical programming for economic analysis in agriculture. Ed. Mac Millan Publishing co., New York. 399 p.

Harwood, J.; R. Heifner; K. Coble; J. Perry; A. Somwaru. (1999). Managing risk in farming: concepts, research and analysis. Agricultural Economic Report 744. Economic Research Service, USDA. 125 p.

Hillier F.; Lieberman G. (2002). Introducción a la Investigación de Operaciones. Ed. Mc Graw - Hill Interamericana, S.A. 8ª ed. 998 p.

Machain, L (2011). Simulación de modelos financieros. Ed. Helemm Impresiones. San Lorenzo, Santa Fe. 514 p.

ModelRisk 5.3.8.9. (2018) de www.vosesoftware.com

Marra, R.; Pena de Ladaga, S.; Ladaga, B. (2016). Diversificación y retenciones II. Análisis mediante modelo de decisión optimizante. Revista Argentina de Economía Agraria. ISSN 0327-3318. Nueva Serie. Volumen XV. Número 1: 50-69.

Pena de Ladaga, S.; Marra, R.; Ladaga, B. Sanguinetti, J. (2015). Diversificación y retenciones: análisis mediante modelo de decisión optimizante. IX Jornadas Interdisciplinarias de Estudios Agrarios y Agroindustriales Argentinos y Latinoamericanos. Buenos Aires, Fac. de Cs. Económicas – UBA, 3 al 6 de noviembre de 2015. Actas ISBN 1851-3794.

Pena de Ladaga, S.; Berger, A. (2006). Toma de decisiones en el sector agropecuario: herramientas de investigación operativa aplicadas al agro. Ed. Facultad de Agronomía. 308 p.

Simon, H.A. (2011). El comportamiento administrativo. Ed. Errepar, 824 p.

Simon, H.A. (1960). The New Science of Management Decision, New York, Harper & Row, Publishers, Inc. p.2.

Vose, D. (2008). Risk Analysis. A quantitative guide. 3rd. Edition. John Wiley & Sons, Ltd. 734 p.

Winston, W.L.; Albright, S.C. (1997). Practical Management Science - Spreadsheet modeling and applications. Belmont CA, U.S.A., Duxbury Press. 796 p.