

## IMPACTO DE LA COMPACTACIÓN POR TRÁNSITO DE MAQUINARIA EN LAS VÍAS DE SACA DE COSECHA FORESTAL

Larocca, Federico<sup>(1)</sup>; Dalla Tea, Fernando<sup>(2)</sup>; Luna, Ayrton<sup>(1)</sup> y Neifert, Miguel<sup>(1)</sup>;

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica Nacional Regional Concordia. Salta 277 Concordia Argentina. [n.p.utnconcordia@gmail.com](mailto:n.p.utnconcordia@gmail.com)

<sup>2</sup>Forestal Argentina S.A. Parque Industrial Concordia. Concordia. Argentina. [fernando.dallatea@masisa.com](mailto:fernando.dallatea@masisa.com)

**Palabras clave:** compactación, suelo, cosecha

### RESUMEN

La cosecha y el tránsito de maquinaria forestal para la extracción de los productos impactan propiedades físicas del suelo que repercuten en la productividad posterior. En este trabajo se presentan resultados de la evaluación de cambios en la Densidad Aparente (Dap) y la Resistencia Mecánica a la Penetración (RMP) desde recién producido el impacto hasta 30 meses posteriores. Además, se evalúa el crecimiento de los árboles en sitios CON y SIN Huellas y se realiza una valoración económica de ese impacto a través de tres métodos diferentes: 1. Merma de productividad 2. Costo de reparación y 3. Valoración contingente.

Los valores registrados de Dap y RMP en las vías de saca fueron superiores a los citados por la bibliografía como limitantes para el crecimiento de los cultivos, con el paso del tiempo se produjo cierta recuperación natural, sobre todo en las capas más superficiales del suelo. Durante el período analizado de 30 meses, se registraron mermas en el crecimiento de la forestación de alrededor del 16% para las parcelas CON Huellas respecto a las SIN Huella. De los tres métodos de valoración económica, dos arrojaron resultados relativamente similares y el “costo de reparación” resultó notoriamente inferior. Se concluye que: se producen pérdidas importantes que pueden ser valorizadas con diferencias según el método utilizado.

### INTRODUCCIÓN

De algo más de 1.200.000 hm<sup>2</sup> de forestaciones implantadas en la Argentina, alrededor del 75% se encuentra en la Mesopotamia –región ubicada al noreste del país, en el límite con Brasil, Paraguay y Uruguay-, especial importancia en las últimas dos décadas ha cobrado la provincia de Corrientes debido al crecimiento exponencial de su superficie forestada que se estima supera las 420.000 hm<sup>2</sup>. Respecto a las especies, *Pinus elliottii* y *taeda* y *Eucalyptus grandis* son las de mayor importancia (Ministerio de Agroindustria de la República Argentina, 2017).

Varios autores han reportado fuertes relaciones entre la compactación del suelo, la resistencia mecánica a la penetración y el rendimiento de los cultivos (Lipiec and Hatano, 2003; Tolon Becerra et al, 2011; Whalley et al, 2008). Fernández et al. (2000) en estudios en el noreste argentino, afirman que “El tráfico del rodado en el terreno se reconoce como la mayor fuente de fuerzas causantes de la compactación” En el caso de la cosecha forestal, se utilizan maquinarias específicas para cortar o extraer los árboles, ya sea en raleo o en tala rasa. En los últimos años se ha ido mecanizando progresivamente, incorporando máquinas de mayor porte y capacidad de trabajo, así como también realizan un mayor número de tareas. Estas máquinas que son capaces de trabajar en condiciones más desfavorables, transportan más carga y a su vez tienen un peso propio mayor. Representan una inversión importante e implican un lucro cesante de relevancia cuando permanecen períodos sin operación.

Según la Guía de Buenas Prácticas Forestales para la Provincia de Corrientes (Rolón, 2014), “cuando el contenido de humedad del suelo es excesivo, se deberían suspender las operaciones temporalmente hasta que las condiciones permitan reanudarlas sin producir los daños como compactación, formación de huellas y mezcla de suelo por tráfico de maquinaria”. Sin embargo la demanda constante de materia prima por parte de los aserraderos, impregnadoras y otras industrias, que operan relativamente independientes de las condiciones meteorológicas, sumado a los problemas de logística que conlleva cambiar de sitio o de zona las operaciones de cosecha y los sociales y económicos que implican tener equipos de trabajo

(personas y maquinarias), parados o suspendidos en épocas lluviosas, llevan a realizar la cosecha y la extracción aún a costa de producir impactos ambientales.

El objetivo de este trabajo es valorar los cambios en algunas propiedades físicas del suelo, estimar el valor de estos impactos en el rendimiento de las forestaciones y estimar su valor por tres métodos diferentes verificando su utilidad para incorporarlos en la toma de decisiones.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Impacto en las propiedades del suelo y en el crecimiento post raleo:** se instalaron y midieron parcelas apareadas (CON y SIN Huellas de maquinaria) en forestaciones de *Eucalyptus grandis* en el departamento Paso de los Libres, (sureste de Corrientes, Argentina), sobre suelos *Paleudalfes ródicos*. Los lotes analizados fueron plantados en el año 2005, con un distanciamiento de 4 metros entre filas y 2,3 metros entre plantas, resultando una densidad inicial media de 1087 plantas/hm<sup>2</sup>. En el año 2008 -3 años de edad-, fueron raleados “a pérdida” llevando la densidad remanente entre 650 y 700 plantas/hm<sup>2</sup>. A los 9 años de edad -entre noviembre de 2014 y febrero de 2015-, se realizó un raleo selectivo con aprovechamiento comercial, dejando una densidad remanente de 313 plantas/hm<sup>2</sup>. Esta operación se ejecutó utilizando un procesador de oruga para el volteo y procesamiento de la madera, y la extracción (principal causante de la huella) con un forwarder marca *John Deere 1710*, el cual extrajo 16 Mg (=toneladas) en cada viaje –con un número variable de pasadas en función de la distancia al borde del lote, ocasionando las huellas en las vías de saca (1 cada 2 o cada 4 entrelíneas). En esta forestación se instalaron 5 pares de parcelas permanentes de medición de 2.240 m<sup>2</sup> para seguir el crecimiento de los árboles y también la Dap y la RMP del suelo en 15 puntos de muestreo. Las mediciones de los árboles se realizaron apenas producido el impacto, a los 18 y 30 meses, mientras que las de propiedades del suelo se evaluaron cada 6-8 meses utilizando un penetrómetro dinámico de cono denominado “Sacamuestras de Uso Extendido (SUE)” desarrollado y validado por UTN Concordia (Larocca, F. 2006), en una misma operación se extraen los datos y muestras para determinar RMP, Dap y contenido hídrico (CH), el último con el objetivo de ajustar el valor de Dap ya que es altamente dependiente, se estratificaron los muestreos en 2 capas de profundidad, la superficial de 0 a 10 cm y la siguiente de 10 a 20 cm.

**Impacto en el crecimiento de una replantación post tala rasa:** se evaluaron pares de parcelas (CON y SIN huellas de maquinaria) en una replantación de *E. grandis* en un suelo *Haplumbrepte fluvéntico* del departamento Concordia (Noreste de la Provincia de Entre Ríos). El lote, originalmente plantado en un marco de 4 x 2,5 m de distanciamiento, había sido cosechado en el año 2016 y replantado -al mismo distanciamiento anterior, pero en el centro de la entrelínea de 4 m- entre setiembre y octubre del mismo año. En la cosecha se había realizado una vía de saca cada 4 entrelíneas, en la que se produjeron huellas entre 5 y 20 cm de profundidad, restando 3 entrelíneas entre dos vías de saca consecutivas que no tuvieron huellas. Posterior a la tala se preparó el suelo en todas las entrelíneas pasando un subsolador entre 40 y 50 cm de profundidad y una rastra de discos enfrentados para armar un “camellón” en el centro del cual se replantó. Al año de la plantación se midió la altura total en 15 pares de parcelas de 12 plantas cada una, las CON Huella en el centro de la vía de saca y las SIN Huella en la siguiente entrelínea.

**Valoración económica:** Para determinar valor del daño por el tránsito de la maquinaria en el lote, se utilizaron tres de los métodos listados por Tomasini (2008):

**1.- Pérdida de productividad,** tomando las mediciones de crecimiento posteriores al raleo, se determinó como valor de la pérdida de productividad a la diferencia de lo producido por las parcelas SIN Huella versus las CON Huella multiplicada por el precio de mercado.

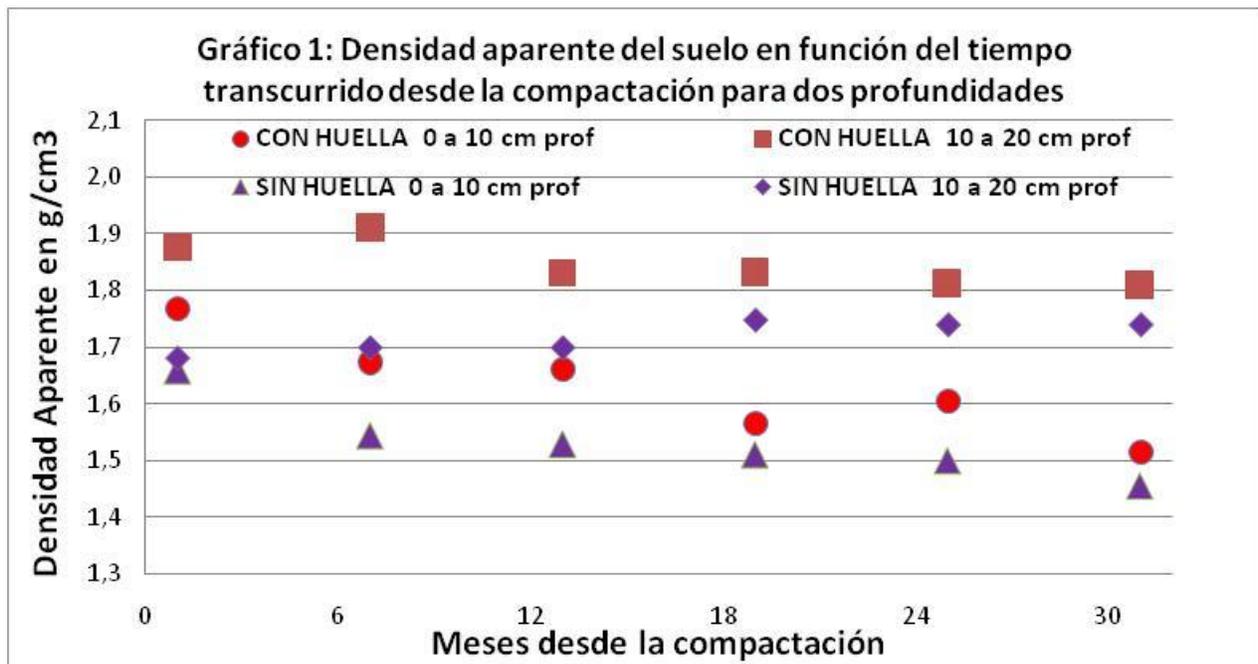
**2.- Costo de reparación,** se estimó como suma de los costos directos e indirectos de una secuencia de labores consistente en: una pasada de despejador, dos de rastra y dos de subsolador, suponiendo el uso de maquinaria propia. Por otro lado se estimó el costo de la realización de las labores por cuenta de terceros, solicitando 3 presupuestos.

**3.- Valoración contingente**, se utilizaron cuestionarios pre-formulados con fotografías detalladas de los sitios CON y SIN Huellas, con ellos se buscó determinar la “disposición a pagar” de 5 “grupos de interés” según su rol dentro del sistema a saber: a.-Propietarios de forestaciones, b.- Ingenieros agrónomos o forestales c.- Prestadores de servicios de plantación, d.- Prestadores de servicios de Cosecha, y e.- Intermediadores comerciales. Se entrevistaron 5 actores de cada uno de los 5 grupos. Para el análisis de las entrevistas cada respuesta es analizó dentro del grupo de interés y en el total de los entrevistados, llegando a un valor medio final a través de un análisis cuantitativo. Las entrevistas fueron presenciales, con un formulario de 8 preguntas, 7 de ellas con valores tabulados para poder operarlos matemáticamente y una abierta final para recopilar datos no previstos. 2 de las 8 preguntas fueron de control.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Propiedades físicas del suelo:** la primera medición en los quince pares de muestras CON y SIN Huella se realizó dentro del mes del impacto (cosecha de raleo). Se repitió a los 4 o 6 meses - dependiendo del lote, (ya que todos los lotes no fueron cosechados en la misma fecha). Posteriormente se continuaron las mediciones cada 6 meses.

**Densidad Aparente:** En la primera medición, resultaron notorias diferencias que muestran la densificación y consecuente disminución de la porosidad en el suelo de la huella respecto a la entrelínea que no la tiene. Aunque ambas situaciones presentaron valores relativamente altos, indicando que tanto donde hubo huella como donde no, estaría compactado el suelo. En la huella los valores fueron entre 6,5 % y 11,5% más altos que en el sector sin huella, las mayores diferencias se presentaron de 10 a 20 cm de profundidad (gráfico 1). Al aplicar la prueba de T para medias apareadas las diferencias resultaron significativas tanto entre “CON Huella” y “SIN Huella”, como también entre las dos profundidades analizadas. En la segunda medición –7 y 8 meses después de la compactación-, para los 10 cm superficiales se muestra recuperación de la porosidad, al disminuir la Dap, no ocurre lo mismo en la profundidad de 10 a 20 cm. A los 25 y 31 meses después de la cosecha, los valores continuó una tendencia a recuperarse, aunque se conservaron niveles altos y mayores en el área CON Huella. La deformación superficial seguía siendo notoria así como el encharcamiento en la huella.



**Resistencia Mecánica a la Penetración (RMP).** Del promedio de los 15 pares de micrositios muestreados en la primera medición en huella y sin ella resultaron notorias diferencias en la Resistencia Mecánica a la Penetración (tabla 1) para las dos capas de profundidad muestreadas. No obstante estos valores requieren ser ajustados a un contenido de humedad (CH) del suelo, requiriendo una función que aún está siendo determinada para este sitio, en esta primera medición el CH era similar en ambas situaciones (alago superior en la huella) y siendo el contraste entre los resultados tan grande, se entiende que las diferencias se van a mantener o aumentar con el ajuste. En las mediciones posteriores la huella se mantuvo en condiciones de anegamiento, mientras que el resto no, lo que hace que para compararlas sea indispensable la mencionada transformación. Los resultados muestran que la RMP fue sensiblemente diferente. Al igual que para Dap, en los primeros 10 cm la diferencia (21%) resultó menor que de 10 a 20 cm de profundidad (70%), esto probablemente se deba a la ruptura que provocó el rodado. Los valores hallados en la segunda capa son notoriamente superiores a los citados por la bibliografía como limitantes para el crecimiento de las plantas.

Tabla 1. Resistencia Mecánica a la Penetración en MPa. Valores sin ajustar por CH. Primera medición. Enero y marzo de 2015			
Situación	0 a 10 cm	10 a 20 cm	Total general
CON Huella	1,598	3,987	2,792
SIN Huella	1,324	2,284	1,804

Estos efectos en las propiedades físicas, entre otros esperables como consecuencia (menor permeabilidad al disminuir la porosidad, alteraciones a nivel de micro sitio tanto en el ciclo del agua como en la actividad biológica y las condiciones de oxidación-reducción, etc), determinaron condiciones menos favorables para el desarrollo de las plantas.

**Crecimiento de los árboles en la plantación raleada** (tabla 2): se encontraron diferencias estadísticamente significativas del crecimiento posterior al impacto entre las parcelas CON Huella y las SIN. En la primera medición –apenas producidas las huellas- los parámetros dendrométricos fueron similares. Pasados 18 meses, se realizó una segunda medición y resultaron mayores los crecimientos en volumen de todas las parcelas SIN respecto a las CON Huella, en promedio fue de 17,4% (55,4 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> vs 47,2 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>). La tercera medición, realizada 30 meses después de la primera, no pudo completarse en los 5 pares ya que algunas parcelas habían sido cosechadas, no obstante quedaron 2 pares completos y otra parcela sin par, en ellas se corroboró que la diferencia continuaba produciéndose. Las SIN Huella volvieron a crecer en un 14% a 16 % más en este último período (43,6 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> vs 37,6 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>).

Tabla 2: Evolución del volumen total en parcelas CON y SIN Huella (en m <sup>3</sup> sólidos/hm <sup>2</sup> )						
Meses desde el impacto	0		18		30	
	SIN	CON	SIN	CON	SIN	CON
Par 1	185,5	220,0	243,0	268,8	-	297,8
Par 2	182,6	184,2	237,4	235,5	-	-
Par 3	163,4	136,5	217,3	175,8	268,1	214,6
Par 4	188,6	184,0	240,4	232,4	274,9	275,0
Par 5	185,0	195,6	245,2	246,1	-	-
Promedio total	181	184	237	232	271	262

SIN = Sin Huella / CON = Con Huella

### **Crecimiento de la replantación posterior a la tala rasa:**

Al año desde la replantación los eucaliptos de la entrelínea SIN Huella tenían 13,5 % mayor altura que aquellos de la utilizada anteriormente para vía de saca y por tanto CON Huella, aunque ya reparada por la preparación del suelo (3,523 m vs. 3,105 m). Las diferencias resultaron altamente significativas en el análisis de la varianza y en la prueba de T para medias apareadas. Este aspecto no debe sólo valorizarse por la mayor producción, sino que además debe tenerse en cuenta que, siendo el *Eucalyptus grandis* es muy sensible a los cuidados culturales durante el primer año, el mayor desarrollo inicial trae consigo otras ventajas como poder superar antes la competencia con otras plantas, los daños de hormigas cortadoras y otras plagas, e inclusive al llegar el invierno, es ventajoso ante la incidencia de las heladas, un factor limitante en la implantación de esta especie. A ello debe sumarse que la preparación del suelo, finalmente similar en cuanto al resultado de las labores en ambas entrelíneas –al menos desde el aspecto exterior-, aquella que tenía las huellas ocasionó mayores dificultades, no formándose fácilmente el camellón, determinando paradas y hasta en algunos casos doble pasada de la maquinaria. Se estimó un tiempo operativo 32 % mayor en las vías de saca que en las entrelíneas que no lo habían sido.

### **Valoración Económica:**

Tomando como referencia los 12 a 14 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> perdidos en la producción de las parcelas CON Huella en los 30 meses posteriores al raleo y dada la distribución diamétrica de las parcelas medidas, se consideró que el crecimiento diferencial entre uno y otro tratamiento corresponde a las categorías comerciales de mayor diámetro en la zona (rollos mayores a 25 cm de diámetro). Este valor convertido a Mg, se multiplicó por el precio de mercado equivalente a 30 €/Mg (TC: 25 \$arg/€). Como resultado se obtuvo un **valor por pérdida de productividad de 355 €/hm<sup>2</sup>**. Se debe tener en cuenta que este valor cuantifica las pérdidas considerando que una cada dos entrelíneas es vía de saca (puede ocurrir que se haga por ejemplo 1 cada 4, en cuyo caso se reduciría a la mitad) y se computa sólo para los 30 meses analizados y los efectos podrían continuar, además sería sólo parcial ya que se estima sobre la productividad de los eucaliptos, pero no se están evaluando otros efectos como alteraciones en el sistema que influyen en el ciclo del agua entre otras cosas, ni tampoco dificultades en las operaciones posteriores (inclusive en la propia cosecha final o preparación del suelo posterior).

El **costo de reparación** se estimó en **117 €/ hm<sup>2</sup>** realizado por administración con maquinaria propia y en **147 €/ hm<sup>2</sup>** contratando el servicio a terceros. Este costo “de reparación” que representa entre 40 % y 50 % de la pérdida de productividad calculada, es un indicador claro de que si las labores son factibles de realizar y recuperan realmente las propiedades que limitan la productividad sería conveniente realizarlas ya que el mayor ingreso sería al menos el doble del costo incurrido. Debe tenerse en cuenta que son costos estimados en distinto “momento” del proceso productivo, es decir mientras el costo de reparación debería imputarse al momento inicial del análisis, el de merma de la productividad resulta de aplicación al final del ciclo cuando se cosecha. No debe soslayarse que este es un método de valoración y resulta en una aproximación, no asegura necesariamente que la aplicación de estas actividades propuestas restauren totalmente la productividad. En cualquier caso, al igual que el método anterior la valoración es sólo parcial, ya que la pretendida “reparación” del suelo nunca es total en cuando al espacio ni a todas las propiedades alteradas.

Por el método de **Valoración Contingente** se determinó un valor de **303 €/ hm<sup>2</sup>** resultante de la determinación media del precio de la tierra (en la zona del estudio de raleo – Paso de los Libres) de 2020 €/ hm<sup>2</sup> y la de pérdida de productividad del 15%. Se destaca la similitud de los resultados obtenidos por este método con el 16 % determinado para pérdida de productividad en las mediciones a campo y el valor mínimo de 5,4 años requeridos para la recuperación es consistente con que a los 30 meses las propiedades físicas continúan con valores altos y las huellas siguen anegadas. Al analizar comparativamente por grupos de

interés, se encontró que los intermediarios de compras-ventas, los propietarios y los que se dedican al servicio de plantación piensan que la tierra tiene un valor sustancialmente mayor a los ingenieros agrónomos y forestales y quienes se dedican al servicio de cosecha. A su vez, quienes prestan servicios de plantación, son los que consideran que la compactación disminuye el valor de la tierra en mayor medida (21%). Por otro lado quienes hacen servicios de cosecha consideran el menor tiempo de recuperación (un promedio de 5,4 años), mientras ingenieros, servicios de plantación e intermediarios son los que piensan que más demora (más de 7 años en promedio de cada grupo). Estas diferencias muestran la influencia del rol de cada grupo en la percepción del impacto es decir: quienes lo ocasionan al cosechar piensan que es menos importante que los que tienen que enfrentar el problema al replantar. De allí la importancia de balancear la cantidad de respuestas según roles en este tipo de valoración.

## CONCLUSIONES

El tránsito con maquinaria para extracción de madera, tanto en raleo como en tala rasa produce cambios en las propiedades físicas del suelo que determinan un menor crecimiento posterior. Estos impactos se potencian cuando las condiciones de humedad del suelo no son adecuadas. Los valores de densidad aparente del suelo resultaron hasta 9% mayores en la entrelínea CON Huella, aunque fueron elevados en ambas situaciones, indicando que se produce compactación no sólo en la vía de saca, sino también en el resto de las entrelineas.

Los valores de Resistencia Mecánica a la Penetración fueron sensiblemente superiores en la Huella representando 21% de incremento para los 10 cm superficiales y 70% de 10 a 20 cm de profundidad, resultando encima de los que se consideran limitantes para el crecimiento de las plantas. Este parámetro, si bien consistente con la densidad aparente, resulta mucho más sensible, arrojando diferencias mucho mayores, no obstante es más impreciso en su determinación y los resultados son más dispersos aunque las diferencias son tan grandes que resultan también estadísticamente significativas.

Si bien ambas propiedades del suelo fueron recuperándose con el paso del tiempo, sobre todo en los 10 cm superficiales del suelo, no llegaron a valores normales después 30 meses.

Esos cambios en las propiedades físicas del suelo, sus interacciones y otros efectos que no fueron valorados en este trabajo (como por ejemplo rotura de raíces en las huellas), determinaron crecimientos posteriores entre 13 y 17 % menores CON Huella.

Al ponerle valor al daño por tres métodos diferentes se obtuvieron resultados entre **117 y 355 €/hm<sup>2</sup>**. El costo de reparación determinó el valor más bajo y la pérdida de productividad el más alto, estando la valoración contingente mucho más cerca del mayor que del primero.

En futuros trabajos se podrían mejorar los resultados realizando mediciones a más largo plazo para valorar la duración del efecto sobre la productividad, ya que en la última medición a los 30 meses seguía diferenciándose el ritmo de crecimiento post impacto. A su vez la Valoración Contingente se podría mejorar con un mayor número de consultados, teniendo siempre en consideración el balance entre los diferentes roles dentro del sector.

## LITERATURA CITADA

- Fernández, R., Lupi, A., Mac Donagh, P., Pahr, N., Garibaldi, J., Alvez, M., Cortez, P. (2000). Compactación de suelos causada por el aprovechamiento de bosques subtropicales en Misiones, Argentina. Buenos Aires: Facultad de Agronomía.
- Larocca, F. 2006. Desarrollo y ajuste de un sistema para monitorear el efecto ocasionado por el tránsito de maquinaria de cosecha en suelos de plantaciones forestales. Tesis de Magister en Ingeniería ambiental. Universidad Tecnológica Nacional. Concepción del Uruguay.
- Lipiec, J and Hatano, R. 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. Geoderma 116, 107-136.
- Ministerio de Agroindustria. (Abril de 2017). Datos Abiertos Agroindustria. On Line. Recuperado el 1 de Abril de 2017, de <https://datos.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=ForestalProduccion>
- Rolón, M. (2014). Cap 9 Cosecha y Extracción. Guía de Buenas Prácticas Forestales para la Provincia de Corrientes. Saiz, Vera Bravo y Luna Eds. AFoA - INTA - Fac. de Cs. Agrarias UNNE.

- Tolon Becerra, A., Lastra-Bravo, X.B., Botta, G.F., Tourn, M., Linares, P., Ressia, M. and Balbuena, R. 2011. Traffic effect on soil compaction and yields of wheat in Spain. Spanish Journal of Agricultural Research, 2011 9(2) 395-403 eISSN:2171-92992
- Tomasini, D. 2008. Valoración económica del ambiente. En R. J. Fernández, V. Cervio, A. Ferrazzino, S. Formento, L. Giuffré, S. Ratto, M. I. Puentes, & L. Giuffré (Ed.), Agrosistemas: Impacto ambiental y sustentabilidad (Primera ed., págs. 187-214). Buenos Aires: Facultad de agronomía UBA.
- Whalley, W.R., Watts, C.W., Gregory, A.S., Mooney, S.J., Clark, L.J., Whitmore, A.P. 2008. The effect of soil strength on the yield of wheat. Plant and Soil 306, 237-247.