

UNIVERSIDAD LAVAL

Facultad de Ciencias Forestales y Geomática

Auspiciado por el

Centro de Investigaciones para el Desarrollo Internacional

Ottawa, Canadá

«El mundo oculto que nos alimenta: el suelo viviente»

Seminarios dados en el

Instituto Internacional para la Agricultura Tropical (IITA)

Universidad de Ibadán, Nigeria

Y en el

Centre Internacional de Investigaciones en Agroforestería (ICRAF) Nairobi, Kenya

Marzo, 1996

Y en la

Academia Ucraniana de Ciencias Agrícolas

Mayo 1996

Por

Profesor **Gilles Lemieux**

Departamento de la Madera y Ciencias Forestales

ORIGINAL EN FRANCÉS

versión española: Profesor José Marcano

<http://forestgeomat.for.ulaval.ca/brf>

Publicación N° 81

Publicado por el

Grupo de Coordinación sobre Madera Rameal

Departamento de la Madera y Ciencias Forestales

Ciudad Québec G1K 7P4

QUEBEC

Canadá

Marzo 1996

Editorio por

Grupo de Coordinación sobre Madera Rameal

Departamento de la Madera y Ciencias Forestales

Facultad de Ciencias Forestales y Geomática

Universidad Laval

Québec G1K 7P4

QUÉBEC

Canada

e. mail

gilles.lemieux@sbf.ulaval.ca

<http://forestgeomat.for.ulaval.ca/brf>

FAX 418-656-2837

tel. 418-656-2131 poste 2837

ISBN 2-921728-30-3

TABLA DE CONTENIDO

- I. Una historia breve: la evolución de los ecosistemas y el comportamiento antropocéntrico del hombre 1
- II. La importancia del bosque en los climas tropicales 2
- III. La composición básica de la madera 3
 - La lignina, sus derivados y su evolución en la dinámica del suelo 5
- IV. Madera del tronco y madera rameal 6
 - 1. Madera del tronco ['caulinar'] y su lignina 6
 - 2. La madera rameal y su lignina 7
 - 3. Los ensayos agrícolas y forestales sobre el uso de la madera rameal 8
- V. Un vistazo a uno de los principios fundamentales en agricultura: la noción de «materia orgánica» 10
 - 1. Algunos razonamientos *a posteriori* 11
 - 2. La racionalidad de la fragmentación 12
 - 3. Más como un alimento que como un fertilizante 12
 - 4. Los principios detrás de la fragmentación 12
- VI. Lignina 15
 - 1. La cuestión de los nutrientes 16
 - 2. El ciclo biológico del agua en clima tropical 17
 - 3. Los nutrientes 'químicos' 17
 - 4. Nitrógeno 17
 - 5. El fósforo 18
- VII. Un primer ensayo de síntesis 19
 - 1. Demasiado agua o demasiado poca 19
 - 2. El papel estructurante de la lignina 20
 - 3. El papel de las cadenas tróficas 20

4. Viviendo más allá de las limitaciones químicas del suelo 21
 5. La causa principal de la degradación de los suelos tropicales 22
 6. La base del funcionamiento de los ecosistemas forestales 22
 7. El papel de la madera rameal en la pedogénesis 24
 8. La segunda ley de la termodinámica: la entropía y la biología del suelo 24
 9. Los aspectos nutricionales de la MRF 26
 10. La pedogénesis en el bosque de Gimnospermas 27
 11. La pedogénesis bajo los bosques de Angiospermas Dicotiledóneas 27
 12. Origen y distribución de los suelos apropiados para la agricultura 28
 13. Algunas reflexiones sobre la madera rameal 29
 14. La desertificación y la energía endógena de los suelos 31
- VIII. El programa de investigación 31
- IX. Hipótesis 32
- BIBLIOGRAFIA 35

NOTA: Esta es traducción de "**The hidden world that feeds us: the living soil**" del Prof. Gilles Lemieux. No es una traducción oficial ya que no se ha hecho las revisiones cuidadosas debidas; su única función es para que sirva como información adicional a estudiantes.

José E. Marcano M.

Departamento de Recursos Naturales

Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña

Santo Domingo, R. D.

Enero 1998

***El mundo oculto que nos alimenta:
el suelo viviente***

por el Profesor **Gilles Lemieux**
Departamento de la Madera y Ciencias Forestales
Universidad Laval

Resumen

Los trabajos de investigación en los últimos veinte años sobre el uso de la madera rameal fragmentada (MRF) tanto en agricultura como en silvicultura han mostrado incrementos en la productividad y modificaciones fundamentales en el suelo, tanto en clima templado como en tropical. Aún cuando todavía no estemos en posición de hacer propuestas substanciadas para su uso inmediato, podemos sugerir una serie de hipótesis que necesitan verificarse en pruebas de campo a gran escala. Una relación clara es la que existe entre el tipo de lignina y el comportamiento de los ecosistemas de Gimnospermas y de Angiospermas. Hacemos notar, particularmente, el papel preponderante que juega la lignina inmadura, bajo la forma de oligómeros o de monómeros, en la estructuración del suelo y en la construcción de las redes tróficas; el papel crítico jugado por los Basidiomicetos en la pedogénesis; y la importancia de la energía endógena en el funcionamiento del ecosistema hipogeo, y su influencia principal en la conservación y distribución de agua biológicamente activa.

I. Una historia breve: la evolución de los ecosistemas y el comportamiento antropocéntrico del hombre

1. La historia nos dice que el hombre, como último de los grandes mamíferos en aparecer sobre la Tierra, no solamente posee un cerebro muy altamente desarrollado, sino que también posee una tremenda capacidad de comunicarse tanto a través de la palabra hablada como a través de su invención de la escritura y el uso de símbolos y abstracciones. Estas son características que ninguna otra criatura puede igualar. Ellas le dan al hombre, al mismo tiempo, cualidades magníficas y fallas incontables.

2. El conocimiento del hombre de su propia evolución, y su orgullo en sus propias realizaciones, le han hecho olvidar de que él es un relativamente recién llegado, y que, milenios antes que él, la ecología terrestre ya estaba bien establecida, con reglas que habían sido bien probadas. Llenos de admiración por nosotros mismos como las culminantes obras maestras de la evolución, nos propusimos a someter la naturaleza a nuestra voluntad. Tomamos ventajas del hecho de que las fuerzas que originaron el estado actual del equilibrio natural eran especialmente generosas, y nos atragantamos en la artesa, mientras dábamos gracias a Dios, Alá, Jehová, Siva o alguna otra deidad. De esta forma, nos hicimos Amos del Mundo - pero un mundo que ya estaba listo para rebelarse contra nuestros excesos.

3. Los eventos recientes nos han obligado a revisar la visión equivocada de la historia que habíamos propuesto para nosotros mismos. Hemos encontrado que, para comprender el campo de nuestras investigaciones - la del suelo y su dinámica - hemos tenido que darnos cuenta que, mucho antes de que el hombre apareciera en escena y que inventara la agricultura para mantenerse a sí mismo, ya había bosques por toda la Tierra, donde quiera que las condiciones lo permitieran. Y hemos concluido que los mecanismos que gobiernan el bosque deben haberse desarrollado junto con el comportamiento del suelo, el cual ha su vez fue modificado por la vegetación que crecía sobre él.

4. Por lo tanto, hemos emitido la hipótesis: (1) ***Si admitimos que, en ausencia de la agricultura, los bosques dominaron la Tierra por millones de años, y que una vez que el hombre hubiere removido la cubierta forestal para trabajarla, el suelo sufrió una degradación importante y una pérdida de fertilidad, entonces los mecanismos que gobiernan la fertilidad del suelo debían ser de origen forestal.*** Esta hipótesis implica que los mecanismos responsables deben tener una base biológica más que química.

5. Tal hipótesis se enfrentará a dos realidades inmediatas. Primero, los pedólogos y los científicos de suelos agrícolas serán altamente escépticos - después de todo, el 98% de sus publicaciones tratan el asunto desde una perspectiva química. Segundo, los expertos forestales serán, por lo menos, indiferentes, ya que en sus enfoques no pueden tratar más allá de los aspectos descriptivos de los suelos. Estas dos actitudes prevalecen no solamente en Quebec, sino también en todos los países del mundo en los que hemos estado en contacto. Esto nos permitió darnos cuenta desde el inicio que el financiamiento para nuestra investigación sería difícil, sino imposible, de obtener, y que los gobiernos no lo verían como un área prioritaria a financiar. En resumen, todo el asunto parece estar en contra de la corriente - y eso, como cualquier investigador sabe, simplemente realza el reto de buscar nuevos conocimientos sobre la evolución social y económica.

II. La importancia del bosque en los climas tropicales

6. Es notable que en los trópicos, la vegetación existe principalmente como cubierta forestal o como crecimiento de tipo desértico. Aquí, el bosque pluvial representa la culminación de la diversidad y de la productividad. Está compuesto por Dicotiledóneas, acompañadas por varias especies de Monocotiledóneas y Criptógamas tales como las *Filicinae* (helechos). Es muy probable que sea este bosque de Dicotiledóneas, tan rico en biodiversidad, que sufriera los primeros desmontes primitivos para dar lugar a la agricultura que, con la expansión de la humanidad, ha alcanzado la escala que vemos hoy.

7. Así, la agricultura echó raíces en el bosque tropical latifoliado, y se expandió a países del mundo templado de la misma manera. Hoy en día reconocemos que la agricultura ha sido un fracaso en áreas de bosque de coníferas, ya sea en los Trópicos de América o en latitudes más al norte, en todo el mundo.

8. Esto nos ha permitido proponer la hipótesis de que (2) ***Los mecanismos que gobiernan fertilidad, pedogénesis, biodiversidad, y productividad primaria y secundaria del suelo dependen de factores que no han sido claramente explorados en la literatura científica del siglo veinte. Por lo tanto, concluimos que solamente el productivismo era la base de todos los razonamientos.***

9. Las limitaciones, aparentes hoy en día, en el uso de fertilizantes químicos, y sus efectos secundarios, señalan la importancia de otros mecanismos que han sido poco explorados hasta la

fecha, aunque se ha dedicado un gran esfuerzo a estudiar el ciclo químico de los nutrientes, en todos los idiomas y en todos los países. Los aspectos biológicos y bioquímicos de la cuestión han sido grandemente ignorados y permanecen pobremente comprendidos, mientras que se ha hecho una gran cantidad de trabajos sobre la degradación y la contaminación, intentando deshacer estos subproductos de nuestra civilización.

10. Las reflexiones e hipótesis anteriores nos llevan a tratar la cuestión desde un punto de vista estrictamente biológico, buscando no solamente describir los diferentes estados sino, sobre todo, los aspectos de su dinámica. Así, hemos fraseado la cuestión en los siguientes términos:

- a) la composición básica de la madera, que es el producto característico de los bosques;
- b) factores bioquímicos en la formación del suelo;
- c) mecanismos biológicos exógenos que afectan la dinámica del suelo;
- d) el sistema por el cual los nutrientes son reciclados en el suelo, incluyendo el papel del agua;
- e) la cuestión de la energía endógena y exógena en el gobierno de la fertilidad del suelo.

III. La composición básica de la madera

11. En toda la literatura que consultamos, generalmente se está de acuerdo en que las plantas están compuestas por celulosa, hemicelulosas y lignina, resultantes de la transformación de la glucosa. En los árboles, la fotosíntesis produce, de manera continua, estas tres sustancias relacionadas, bajo la forma de almacenamientos energéticos. Una consecuencia física de esto es que las ramas son rígidas, y que crecen en diámetro año tras año. De hecho, la madera de los árboles es muy pobre en nutrientes, aparte de los que se encuentran en la capa del cambium. La madera está confinada a un papel físico de soporte y transporte, sin función biológica ni dinámica.

12. Así, siendo otras cosas iguales, solamente la lignina entre estos constituyentes básicos muestra alguna marcada variación en su estructura. La lignina es una de las macromoléculas naturales más compleja y menos conocida porque, hasta ahora, ha sido considerada como un simple subproducto inútil que provoca problemas importantes de contaminación de las corrientes de agua [para la industria de la pulpa y del papel]. Ahora sabemos, sin embargo, que las Gimnospermas (coníferas), Dicotiledóneas y Monocotiledóneas contienen tipos diferentes de lignina que se presentan bajo la forma de ciclos aromáticos simétricos con dos grupos metoxilos (OCH_3) o lignina "siringuil", en el caso de las Dicotiledóneas, mientras que en las Coníferas esta lignina es asimétrica, con un solo agrupamiento metoxilo o lignina "guayacil". Las Monocotiledóneas presentan una mezcla de estos dos tipos al que se le agrega un tercer tipo que no tiene algún grupo metoxilo en sus anillos aromáticos.

13. Los árboles de Dicotiledóneas están asociados a suelos brunisólicos (suelos de color marrón oscuro), que poseen una estructura estable y elaborada basada en la presencia de agregados. Encontramos una gran biodiversidad entre la microfauna y microflora en sus sistemas hipogeos, y en la macroflora epígea. Por el otro lado, los bosques de coníferas están asociados a suelos podsólicos con la precipitación del hierro en los horizontes inferiores y una acumulación de materia vegetal ["hojarasca"] en la superficie. Este tipo de suelo presenta numerosos obstáculos al libre flujo de nutrientes. La biodiversidad es muy reducida, especialmente en el ecosistema epígeo donde solamente prosperan unas pocas especies. Así, encontramos dos tipos básicos de controles del ecosistema: uno basado en la "mega-biodiversidad", y el otro en la "oligo-biodiversidad".

14. El tercer tipo de suelo, el asociado con Monocotiledóneas, usualmente contiene agregados que son de color oscuro, pero inestables en presencia de agua. Este tipo de suelo se encuentra solamente en regiones de baja pluviometría (estepas, pampas, las praderas de Norteamérica, etc.). La materia vegetal se acumula más rápidamente que lo que la combustión biológica puede eliminarla, debido a la ausencia de agua necesaria para la transformación. Estos suelos son fértiles, pero frágiles, y se degradan fácilmente bajo uso agrícola y sólo pueden soportar una limitada población humana.

15. Fuimos incapaces de encontrar alguna descripción o clasificación para una parte extremadamente importante de los árboles y arbustos - sus ramas y ramitas. Es en las ramas que sucede la fotosíntesis, y que las moléculas de glucosa se convierten en tejidos vegetales. Como estimado bruto, el crecimiento de ramas alcanza, en total, a billones de toneladas en la Tierra. Sólo en Quebec, tal producción puede alcanzar a 100,000,000 de toneladas por año, a juzgar por los valores dados por el programa ENFOR, ajustados por un factor de productividad de los arbustos.

16. Tan temprano como 1986, propusimos usar el término "**ramial wood**¹" [o "**ramial chipped wood**²" - **RCW** - luego de procesarla] para este material, que hasta ahora había sido considerado como un simple desecho industrial molesto. Además de celulosa, hemicelulosa y lignina, la madera rameal contiene muchas clases de proteínas, todos los aminoácidos, y casi todos los azúcares y almidones, lo mismo que polisacáridos intermedios. También contiene incontables sistemas enzimáticos y hormonas, lo mismo que polifenoles, aceites esenciales, terpenos, taninos, etc. que están asociados en grados diversos con los nutrientes necesarios para generar y soportar la vida.

17. Muchos de estos productos, tales como enzimas, aminoácidos y varios tipos de proteínas, son extremadamente frágiles. Otros puede usarse como fuentes inmediatas de energía, tales como los azúcares, seguidos por las celulosas y hemicelulosas. La lignina restante, con su estructura molecular tridimensional, es una de las creaciones más compleja de la naturaleza. También es una fuente importante de energía, pero una de difícil acceso, ya que esta energía está contenida en los anillos aromáticos que muy pocos organismos están adaptados para digerirlos. Entre estos pocos están los protozoos y las bacterias, pero los más importantes son los hongos del grupo de los Basidiomicetos.

La lignina, sus derivados y su evolución en la dinámica del suelo

18. Hace casi un siglo, se postularon teorías acerca del papel importante de la lignina en la generación de suelos. Sin embargo, el trabajo científico durante las últimas décadas ha enfocado menos ese aspecto que en aprender más acerca de las propiedades moleculares de la lignina que puedan ser usadas para acelerar su degradación como un contaminante. Desde este punto de vista, el trabajo de los últimos diez años ha producido varios hallazgos y conclusiones acerca de la estructura de la molécula de la lignina y, sobre todo, sus modos de evolución. (Ver **Erikson, K.E.L., Blanchette, R.A. & Ander, P., 1990; Rayner, A.D.M. & Boddy, L., 1988**).

19. Empezando con la glucosa, se forma alcohol coniferílico, el cual produce lignina en forma de monómeros, los cuales entonces son polimerizados gradualmente en el tiempo. Los más importantes de estos en términos de estructura y contenido energético serán los núcleos bencénicos: ellos llegarán a ser los principales elementos de la estructura estable del suelo.

20. Esta estructura molecular, aún cuando esté altamente polimerizada, puede sufrir varias transformaciones, originando polifenoles, ácidos grasos, aceites esenciales, terpenos, taninos, etc. (Kristeva, L.A., 1953). Cada uno de estos tiene efectos perceptibles sobre el metabolismo de la planta y sobre los diversos parámetros de la cadena trófica.

21. Así, los taninos asociados a proteínas en el proceso de amarillamiento otoñal sirven para prevenir que las hojas se degraden y pierdan nutrientes valiosos. Por el otro lado, sólo algunas bacterias, aquellas usualmente asociadas con la micro o mesofauna del suelo, tienen los sistemas enzimáticos necesarios para degradar estos taninos y así liberar las proteínas y los nutrientes químicos de ellos. Aquí tenemos un excelente ejemplo en el cual los nutrientes son reciclados con la ayuda de derivados de la lignina, y aún así estamos todavía convencidos, en general, de que necesitamos aprender más para así mejorar la nutrición de las plantas: **lo que realmente necesitamos hacer es decodificar la nutrición del suelo y los factores responsables de distribuir energía y nutrientes.**

22. Virtualmente toda la literatura científica hasta la fecha se ha restringido a tratar la evolución de la lignina y la celulosa únicamente en términos de degradación de la madera. Este enfoque estrecho estorba severamente nuestros intentos de comprender la dinámica de generación del suelo. Aún así, esto no ha impedido de que sigamos creyendo en que estamos sobre un camino muy promisorio en la comprensión de los resultados de una serie de experimentos realizados entre 1978 y 1986, que en su momento no pudieron explicarse. (Guay, E., Lachance, L., & Lapointe, R.A., 1982; Lemieux, G. & Lapointe, R.A., 1985; Lemieux, G. & Lapointe, R.A., 1989; Lemieux, G. & Lapointe, R.A., 1990; Lemieux, G. & Toutain, F., 1992)

IV. Madera del tronco y madera rameal

1. Madera del tronco ["caulinar"] y su lignina

23. Para comprender bien los mecanismos involucrados en la formación de un suelo fértil, tenemos que, en primer lugar, comprender la diferencia entre la madera del tallo o tronco de los árboles, y la de las ramitas. Concluimos que la madera caulinar, pobre en nutrientes, estaba constituida de tal manera que hacía difícil la degradación y que todo concurría para su protección, asegurando la vida, la cual a veces se podía extender durante miles de años como sucede en los géneros *Sequoia* y *Sequoiadendron*. Por otra parte, hay que estar consciente que la formación de turba a partir de árboles, arbustos y de Monocotiledóneas se podía producir por un bloqueo *post mortem* de la degradación, provocando así acumulaciones muy importantes de materia vegetal no humificada y perfectamente conservada. En ambos casos, es la presencia de lignina altamente polimerizada que es responsable de los productos que detienen la despolimerización y la degradación estructural de la madera o de los tejidos leñosos.

24. Este alto grado de polimerización de la lignina, sea del tipo siringuil o del guayacil, puede dar origen a los taninos, catequina y ácido catéquico y que provocará muchos de los problemas encontrados cuando se usa aserrín o virutas de madera para el mejoramiento de los suelos agrícolas cuyas estructuras eran deficientes o arruinadas. En este caso, la relación polisacáridos a proteínas (la relación C/N) se sitúa entre 400 y 700/1. En la mayoría de los casos, estos materiales han sido usados para hacer "composts" que, casi siempre, han sido fracasos, debido a las grandes cantidades de nitrógeno que había que añadir a la mezcla para obtener una humificación apropiada (las pérdidas en masa y en energía térmica pueden ser tan altas como de un 60%).

25. Estos materiales originarios de la madera caulinar, cuando se aplican en la superficie bajo la forma de un mantillo artificial, necesitan igualmente mucho nitrógeno adicional para iniciar la humificación. Esto se debe al hecho de que la despolimerización debe ser hecha principalmente por bacterias que trabajan con una enzima específica, la laccasa. El proceso es lento, costoso e incierto.

2. La madera rameal y su lignina

26. Las primeras experiencias con la madera rameal esparcida y mezclada con los primeros centímetros del suelo mostraron resultados positivos, aunque perturbadores, con aumentos de rendimiento y modificaciones importantes en los patrones de crecimiento y la patología de las especies cultivadas. Tuvimos que admitir que estábamos frente a un fenómeno del cual no había alguna mención en la literatura. No solamente la descripción bioquímica y nutricional de esta parte de los árboles no había sido hecha, sino que tampoco se había intentado relacionar entre ellos los diferentes componentes, aún cuando estos eran conocidos (**Lemieux, G. & Lapointe, R.A.**, 1986).

27. Las ramas de menos de 7 cm de diámetro³ contienen una lignina que está poco polimerizada, o existe en la forma de monómeros, y también contienen pocos polifenoles, resinas o aceites esenciales que son difíciles de transformar. Las observaciones de campo lo mismo que la literatura muestran que esta madera rameal es consumida por casi todos los rumiantes, pero no así con la madera caulinar. También es a este nivel que suceden los ataques de insectos, hongos patógenos, bacterias y otros. Igualmente, los efectos de las deficiencias minerales en un árbol son más probable que aparezcan en las hojas y las ramitas jóvenes. Llegamos a la conclusión de que la madera rameal es en verdad, el lugar de fabricación de la madera, de la lignina, de los polisacáridos, de todo los *ósidos*⁴, lo mismo que de las proteínas. Representa, por lo tanto, una fuente importante de nutrientes y energía pudiendo ser utilizada por casi todos los niveles de vida.

3. Los ensayos agrícolas y forestales sobre el uso de la madera rameal

28. En los inicios de los años 80, **Guay, Lachance & Lapointe** (1982) publicaron dos reportes técnicos sobre "El uso de la madera rameal fragmentada y estiércol en agricultura", con notas y observaciones sobre varios ensayos en agricultura usando fragmentos de ramitas provenientes de las podas urbanas de árboles. Los resultados que ellos reportaron sobre la productividad son de especial interés.

29. Fue dentro de un contexto de búsqueda de productos nuevos de la madera, no tradicionales, que Edgar Guay, Vice-Ministro Adjunto en el Ministerio de Bosques de Quebec, realizó los primeros experimentos en cuanto al uso de la MRF. Luego de haber notado que se perdían anualmente millones de toneladas de ramitas de todos los tipos, empezó a buscar en ellas por nuevos productos. Una de las primeras posibilidades que él investigó fue la de los aceites esenciales. Observó que las plantas existentes de destilación (aún en su infancia) estaban rodeadas por montones de ramitas fragmentadas sin usar y él se empeñó en analizarlas para conocer sus contenidos.

30. Rápidamente se dio cuenta que estas ramitas fragmentadas eran extremadamente ricas en nutrientes químicos, lo mismo que en productos de origen bioquímico, tales como proteínas y aminoácidos. Dejando al lado, momentáneamente, el tema de los aceites esenciales, él prestó toda su atención al posible uso de este material como un mantillo agrícola, particularmente en relación al cultivo de la papa. Aunque en una escala modesta, los resultados de sus experimentos fueron muy interesantes.

31. Este primer ensayo era la conclusión de numerosas lecturas que le permitieron combinar la técnica americana del "sheet composting" (compost superficial) y los métodos promisorios usados por Jean Pain en Francia, quien había desarrollado una técnica de "composting" de desbrozos y arbustos. Él decidió entonces, con la ayuda de productores agrícolas, esparcir los fragmentos de ramitas y mezclarlas con los primeros centímetros del suelo.

32. Como no había nada de descripción ni conocimientos en la literatura, Guay, Lachance y Lapointe se inclinaron por considerar a estas ramitas como otra forma de madera convencional que, como se sabía, requeriría grandes cantidades de nitrógeno para descomponerse. Es así que ellos decidieron mezclar los fragmentos de madera de ramitas con estiércol de cerdo, una fuente de nitrógeno bien conocida, eliminando así una fuente importante de contaminación de la capa freática y de las corrientes de agua.

33. Los resultados no tardaron en aparecer, particularmente con la desaparición de los olores, una transformación rápida de los fragmentos y un aumento en los rendimientos del año siguiente, y continuó así durante varios años más. Ellos obtuvieron los siguientes resultados:

Un aumento de más de 50% en el contenido de materia orgánica.

Un aumento del pH.⁵

Aumentos en los rendimientos que varían de 30% a 300%, dependiendo del cultivo.

Estos aumentos en la productividad se manifiesta en volumen o en el contenido en materia seca, como en el caso de las papas.⁶

Una reducción en el consumo de agua.

Una modificación importante en el crecimiento y preponderancia de malezas.⁷

Una reducción muy importante de insectos y enfermedades.⁸

Una mayor resistencia al frío y a la sequía.

34. De la revisión de los resultados obtenidos durante esa época, nos convencimos de que era claramente un descubrimiento importante. No solamente se manifestaba como un aumento de los rendimientos sino que también, lo que es más importante, parecía señalar la manera de gestionar los equilibrios químicos y físicos a través del uso de controles biológicos que podíamos realmente seguir.⁹

V. Un vistazo a uno de los principios fundamentales en agricultura: la noción de «materia orgánica»

35. Ya que los cambios observados en la estructura y color del suelo se mantenían después de varios años, concluimos que nuestros ensayos estaban actuando sobre los mecanismos de la pedogénesis, esto es, de la generación del suelo en sí [la cual es bien conocida por los silvicultores pero nueva a la agricultura]. También se hacía claro que ningún principio científico apoyaba el uso de los insumos tradicionales, excepto por el de la **mineralización**. Estábamos cercanos a la fuente de los principios de la **humificación**, que nos llevarían a un mundo mal comprendido, y con frecuencia desconocido, y al cual ahora podríamos tener acceso a través del concepto básico de la pedogénesis de origen forestal asociado al productivismo agrícola.

36. Poco a poco, llegamos a darnos cuenta que enfrentábamos la posibilidad de penetrar en el interior de ese mundo biológico que controla la formación de los suelos. El aporte de la madera rameal nos permitirá, a largo plazo, comprender como funciona el ecosistema hipogeo y cual es la dinámica biológica que, junto con la geología, las leyes de la física, de la química mineral y de bioquímica, gobierna este mundo oculto que todavía es desconocido para nosotros, excepto bajo la perspectiva de la química.

37. Hasta aquí, debido a la incapacidad de comprender los mecanismos que rigen el suelo, nos hemos limitado a comprender todo bajo el ángulo del control químico, usando fertilizantes, enmiendas del suelo, etc. Llevando aún más lejos esta lógica, hemos llegado a considerar al suelo como un simple apoyo físico [para las plantas]. El paso siguiente fue eliminarlo completamente, para utilizar los fertilizantes en solución para los cultivos hidropónicos.

38. De este punto de pensar, no tomó mucho tiempo para el siguiente paso de percibir y medir la "*materia orgánica*" en el suelo como un simple estado de transición hacia la liberación de sustancias químicas que promoverían el crecimiento de las plantas. Así, este concepto trata a la "*materia orgánica*" como un insumo químico que podría, también, usarse para mantener ciertos parámetros físicos, como el control de la atmósfera del suelo, la eliminación de los gases resultantes de la actividad microbiológica, y en general asociados a los mecanismos de **degradación**. Y en este contexto, solamente la noción de fertilizante es reconocida, particularmente de nitrógeno.

39. Eventualmente, fuimos capaces de formular la hipótesis de que: (3) ***El concepto de madera rameal podría ser una herramienta valiosa para el estudio y la comprensión de la formación del suelo y de la dinámica que lo caracteriza, considerada sobre todo como la distribución de los nutrientes químicos esenciales para el crecimiento de las plantas.*** Nos tomó unos buenos diez años antes de que empezáramos a comprender las interioridades de estos mecanismos, y como ellos aparecen y desaparecen. Aunque habían aparecido, durante la década precedente, varias publicaciones importantes sobre los mecanismos biológicos relacionados con la dinámica de los nutrientes, el primer ensayo comprehensivo de síntesis fue el de **Perry, Amaranthus, Borchers, Borchers & Brainerd**, en 1989. Este importante trabajo del equipo de Corvallis, en Oregon State University, estaba orientado sobre el comportamiento de los diversos niveles biológicos, siendo las micorrizas y sus efectos el punto central de experimentación, síntesis y comprensión.

40. Los trabajos del equipo de Corvallis, tan notables como eran, estaban enfocados primariamente a tratar de explicar tentativamente las cosas de un solo nivel –la vida en sí– en un espíritu de competencia y complementariedad, lo cual era la única manera de comprender nuestro mundo en esa época. Con la madera rameal, hemos podido volver nuestra atención a otros niveles, tanto en silvicultura como en agricultura, y estábamos determinados a entrar en ese mundo complejo del suelo, tan vital para nuestra economía. El gobierna los nutrientes, pero también protege, con sus innumerables nichos, a una increíble diversidad de formas de vida, desde virus hasta los mamíferos más evolucionados. También es el "banquero", el "gerente" y el "motor" de la vida terrestre. Igualmente es todo eso para todos nutrientes químicos y bioquímicos que resultan de la síntesis y la retrosíntesis¹⁰ de compuestos, siendo los más frecuentes los derivados de la lignina y la gran variedad de polifenoles, y de lo que conocemos actualmente del humus, humina, humatos, y de los ácidos húmico y fúlvico.

1. Algunos razonamientos *a posteriori*

41. Las observaciones y mediciones citadas anteriormente deben encontrar explicaciones bajo ángulos múltiples y en varios niveles. Los resultados y las implicaciones son demasiado numerosas para que no haya concordancia sobre los puntos fundamentales, tanto físicos y químicos como biológicos. Paradójicamente, si tenemos un conjunto coherente de datos, debe haber un lado incoherente a falta del cual tendríamos un sistema rígido que produciría siempre los mismos resultados. Para postular buenas hipótesis de trabajo, debemos tener en cuenta los dos lados de la moneda.

42. A través de numerosos encuentros y discusiones en varios países, lo mismo que por las lecturas de trabajos sobre el tema en todo el mundo, nos hemos convencido de que estamos entrando a un territorio inexplorado cuando enfrentamos la pedogénesis desde una óptica forestal. Más aún, nuestros experimentos forestales y sus resultados sugieren de que la aplicación de **MRF**¹¹ tiene una influencia importante sobre el comportamiento del ecosistema, con un énfasis particular sobre la germinación y la competencia de las plantas.

2. La racionalidad de la fragmentación

43. Desde hace mucho tiempo se ha reconocido que el hecho de regresar al suelo las ramitas y hojas de los árboles tiene un efecto beneficioso, pero ha habido pocos intentos de realmente medir este efecto. En realidad, pocos se preocuparon del tema y se contentaban simplemente con ver desaparecer esa "basura". Como prueba de ello, miremos como las ramas son regularmente exportadas del bosque cuando se corta para algún otro uso más lucrativo (**Freedman, B.** [1990] *In Lemieux, G.*, 1991). La fragmentación de las ramitas fue hecha al inicio como una técnica simple, necesaria para laborar y trabajar el suelo. Pero a medida que comprendíamos los mecanismos involucrados, llegamos a considerar de forma diferente la práctica —similar a la forma en que los animales mastican sus alimentos para permitir una acción enzimática más eficaz.

3. Más como un alimento que como un fertilizante

44. La noción de alimento implica la asociación de dos aspectos que son la energía necesaria para hacer funcionar el sistema, y la de los compuestos químicos (fertilizantes) y sus intermediarios bioquímicos (proteínas, aminoácidos, azúcares, celulosa, etc.). Desde muy temprano, hemos tenido que derivar conceptos tradicionales que llevan directamente a la mineralización, esto es, la disociación entre la energía y los nutrientes. Así, el tratamiento de las materias orgánicas de origen animal o vegetal encontró una técnica de tratamiento privilegiado con los sistemas de "composting", en los cuales la disociación energía - nutrientes sucede por fermentaciones bacterianas y fúngicas termófilas, con una disipación de la energía térmica y la recuperación de nutrientes y residuos orgánicos, dominados por ligninas degradadas y subproductos polifenólicos. Aunque esta es una forma de combustión enzimática, tiene muchas analogías con la combustión por el fuego a altas temperaturas (**Kirk, T.K. & Farrell, R.L.**, 1987).

4. Los principios detrás de la fragmentación

45. Si la evidencia de la eficacia de la transformación de la MRF era cada vez más clara, los principios de base continuaban eludiéndonos. Fue solamente en 1989 cuando descubrimos por primera vez los mecanismos que permitían la liberación de energía mientras conservaban partes importantes de la lignina, esto es, los núcleos bencénicos de alta energía.

46. A inicios de los años 80, varios autores, tanto en América como en Asia y en Europa, publicaron trabajos importantes que trataban de la lignina, su estructura y su degradación por vía enzimática. Los principales trabajos son los de **Kirk, T.K. & Fenn, P. (1982)**, **Tien, M. & Kirk, T.K. (1983)**, **Kirk, T.K. & Farrell (1983)**, **Lewis, N.G., Razal, R.A. & Yamamoto (1987)**, **Leisola, M. & Waldner, R. (1988)**, **Leisola, M. & Garcia, S. (1989)**, y **Leatham, G.F. & Kirk, T.K. (1982)**. Pero estábamos sorprendidos por el hecho de que toda esta investigación estaba dirigida exclusivamente a alcanzar la comprensión de los mecanismos de degradación que fueran útiles para eliminar la lignina, una de los principales contaminantes de la industria de la pulpa y papel. Este enfoque "negativo" en la comprensión de la lignina tenía su valor, desde luego, y era de esperarse, dada la mentalidad de nuestra sociedad industrial que usa los capitales generados para su propio crecimiento, dejando de lado todo lo que pueda afectar la posibilidad de alcanzar beneficios.

47. El trabajo que nos puso sobre la pista de la comprensión ha sido sin dudas el del finlandés Leisola y del francés García, en 1989. Ellos explicaron el mecanismo enzimático responsable de la despolimerización de la lignina, en términos de la producción de dos macromoléculas, una de bajo peso molecular que hemos relacionado con el ácido fúlvico, y la otra con un peso molecular bien alto que hemos reconocido como ácido húmico. Todavía más interesante, ellos precisaron que bajo la acción de una enzima específica, la lignoperoxidasa dependiente del manganeso, la molécula mayor se fijaba sobre el micelio del Basidiomiceto (*Chrysosporium phanerochaete*), impidiendo recombinaciones con la fracción fúlvica. Esto resultaba en compuestos con frecuencia estables, con propiedades antibióticas u otras del grupo de los polifenoles. Esta fijación de la macromolécula sobre el micelio confería al medio un color marrón, característico de los brunisoles (suelos marrones). Este cambio de coloración de los suelos ha sido observado frecuentemente cuando se aplica MRF en agricultura.

48. Muchos estudios han examinado el comportamiento de numerosos sistemas enzimáticos que juegan un papel fundamental en la "degradación" de la lignina. Algunos de ellos son: **Dordick, J.S., Marlette, M.A. & Kilbanov, A.M. (1986)**, **Erickson, K.E.L., Blanchette, R.A. & Ander, P. (1990)**, **Garcia, S., Latge, J.P., Prévost, M. C. & Leisola, M. S. (1987)**, **Jones, A. & O'Carroll, L. (1989)**.

49. Todas estas publicaciones venían a reforzar los conocimientos que teníamos del papel de los Basidiomicetos en los suelos forestales, aunque ellos estaban singularmente ausentes de los suelos agrícolas. Un número bien grande de autores se refieren a los Basidiomicetos bajo el nombre de "white rots" (traducido en español como "hongos de las pudriciones blancas" o, simplemente, "pudriciones blancas"), término que todavía hace referencia a la función "degradante" de estos organismos. Este papel de los Basidiomicetos es visto igualmente bajo el ángulo de la micorrización, como en **Amaranthus, M.P. & Perry, D.A. (1987)**, **Amaranthus, M.P., Li, C.Y. & Perry, D.A. (1987)**, **Hintikka, V. (1982)**, **Kirk, T.K. & Fenn, P. (1982)**, **Perry, D.A., Amaranthus, M.P., Borchers, J.G., Borchers, S.L. & Brainerd, R.E. (1989)**. En lo referente al papel de los Basidiomicetos en la estructuración del suelo, considerado todavía bajo el ángulo de la degradación, numerosos autores han aportado informaciones valiosas como en **Erikson, K.E.I., Blanchette, R.A. & Ander, P. (1990)**, **Hintikka, V. (1982)**, **Kirk, T.K. & Fenn, P. (1982)**, **Levy, J.F., Rayner, A.D.M. & Boddy, L. (1988)**, **Tate, R.L. (1987)**, **Vaughan, D. & Ord., B.G. (1985)**.

50. De todos estos autores mencionados, hemos aprendido mucho sobre los últimos trabajos realizados para comprender la degradación de la madera como tal o en el ecosistema forestal. En la

medida en que nos entremos en la lógica de la "*materia orgánica*" y de su papel beneficioso en agricultura, las relaciones entre la lignina y la fertilidad se desvanece para desaparecer a favor del concepto de fertilidad anual que se mide en rendimientos, siendo relegados los otros parámetros a un estado subsidiario. Es evidente que la noción de '*materia orgánica*', que había sido transferida sin modificación de la agricultura a la silvicultura, representaba una pared que había que franquear si deseábamos comprender algo lo que estábamos observando.

51. Es así que llegamos a interesarnos en las relaciones entre las diferentes formas de vida, en particular de la microfauna, y los efectos observados por los diferentes autores. Estas formas de vida parecían llegar cada vez más al corazón de la cuestión que nos preocupaba. Mientras más explorábamos en el tema, más evidente se volvía que el papel de los hongos & tan importantes, sin embargo, que ellos sean & no era suficiente para explicar ni la dinámica de la formación del suelo ni el reciclaje de los nutrientes. Era necesario que otros niveles de vida estuvieran implicados para formar lo que hasta ahora se ha convenido en llamar *cadena trófica*, donde todos los niveles de vida intervienen en el proceso vital de almacenamiento y liberación de energía, y poniendo a disposición los nutrientes de origen químico, mineral y bioquímico.

52. En este asunto, estamos en deuda, en particular, con los autores siguientes: **Anderson, J.M.** (1988), **Anderson, J.M., Coleman, D.C. & Cole, C.V.** (1981), **Bachelier, G.** (1978), **Breznak, J.A.** (1982), **Larochelle, L.** (1993), **Larochelle, L., Pagé, F., Beauchamp, C. & Lemieux, G.** (1993), **Pagé, F.** (1993), **Parkinson, D.** (1988), **Sauvesty, A., Pagé, F. & Giroux, M.** (1993), **Swift, M.J.** (1976), **Swift, M.J., Heal, O.W. & Anderson, J.M.** (1979), **Toutain, F.** (1993). Todos estos autores abordan la cuestión bajo el ángulo de la misma dinámica: depredación y transferencia de energía de un nivel a otro, con las implicaciones inevitables sobre la transferencia de nutrientes. Y, sin embargo, ninguno de estos autores ha abordado la cuestión de los mecanismos energéticos, aparte de aquellos ya conocidos a todos los niveles como la transformación de la adenosina trifosfato en adenosina difosfato con emisión de una gran caloría, donde la glucosa se usa como fuente energética.

VI. Lignina

53. Como hemos señalado antes, las ramitas nunca habían sido consideradas como un material útil, y nunca habían sido descritas científicamente. Por lo tanto, la presencia de lignina bajo forma de monómero nunca ha sido objeto de discusión en una función energética particular. Sin embargo, varios autores han hecho alusión a la complejidad de esta macromolécula y han supuesto, sin más, un papel importante en la formación del humus y también en la producción de polifenoles juzgados indeseables. Entre estos autores están **Dordick, J.S., Marlette, M.A. & Kilbanov, A.M.** (1986), **Erikson, K.E.L., Blanchette, R.A. & Ander, P.** (1990), **García, S., Latge, L.P., Prévost, M. C. & Leisola, M.S.A.** (1987), **Glen, J.K. & Gold, M.H.** (1985), **Jones, A. & O'Carroll, L.** (1989), **Kirk, T.K. & Farrell, R.L.** (1987), **Leatham, G.F. & Kirk, T.K.** (1982), **Kirk, T.K. & Fenn, P.** (1982), **Leisola, M.S.A. & Waldner, R.** (1988), **Leisola, M.S.A. & García, S.** (1989), **Lewis, N.G., Razal, R.A. & Yamamoto, E.** (1987), **Rayner, A.D.M. & Boddy, L.** (1988), **Stott, D.E., Kassim, Jarrell, J.P., Martin, M. & Haider, K.** (1993), **Tate, R.L.** (1987), **Vaughan, D. & Ord, B.G.** (1985), y **Vicuna, R.** (1988).

54. Bajo diferentes aspectos, estos autores discuten la estructura de la lignina y la importancia de sus grupos metoxilos según el origen de la lignina, la "fragilidad" y la "digestibilidad" de la lignina cuando está poco polimerizada, y la facilidad que ella puede ser despolimerizada. Aquí fue cuando nos dimos cuenta de la importancia de esta lignina joven como fuente de energía, no solamente

luego de la transformación de la celulosa, sino igualmente usando o no la energía considerable contenida en los núcleos bencénicos, siendo reservados algunos para la constitución del humus. La lignina jugaría así un papel doble: como fuente energética, y como constructora del medio que se convertirá en suelo, centro de la regulación y, a la vez, de gestión de la vida y de los nutrientes por vía del reciclaje.

55. Sería entonces a este nivel que se situarían los bloqueos que llevan a niveles de fertilidad cada vez menores, aún en presencia de todos los nutrientes necesarios para un buen crecimiento de las plantas del ecosistema hipogeo. No intentaremos aquí discutir las varias vías que los nutrientes deben tomar para estar disponibles en el "orden apropiado" para la vida vegetal. Podemos citar, como un ejemplo, las lombrices de tierra que se asocian con las bacterias en colonias en sus sistemas digestivos para atacar los pigmentos marrones de las hojas. Estos pigmentos marrones están formados por la asociación de un polifenol (taninos) con las proteínas impidiendo la degradación de los nutrientes (**Toutain, F.**, 1993). Un proceso similar ocurre en la relación entre los Basidiomicetos y numerosas especies de ácaros y colémbolas en el reciclaje de nutrientes, los cuales, a través de la masticación, producen una fragmentación cada vez mayor y abren el camino para los ataques enzimáticos o bacterianos (**Swift, M.J.**, 1977; **Larochelle, L., Pagé, F., Beauchamp, C. & Lemieux, G.**, 1993).

1. La cuestión de los nutrientes

56. Esta cuestión ha sido tradicionalmente presentada en términos más bien simplistas, clasificando los elementos de la tabla periódica de Mendeleeyeff según su contribución en la producción de los cultivos al costo más bajo posible. Tres elementos aparecen en la cabeza: nitrógeno, fósforo y potasio, a los cuales se les pueden añadir otros elementos como hierro, silicio y todo el grupo de los oligoelementos. Esta clasificación en *macroelementos* y *oligoelementos* es típica de la perspectiva "industrial" que tenemos de la productividad agrícola y que, a través de los años, ha venido igualmente a dominar el vocabulario forestal.

57. A decir verdad, esta percepción es más bien insólita en cuanto que mira el crecimiento de las plantas solamente en términos de las sales minerales que lo promueven. Ahora está bien claro que esta visión productivista muestra sus límites de múltiples maneras: la erosión de los suelos y la llegada constante de nuevos parásitos, de enfermedades fúngicas, bacterianas o virales. Las sumas que nuestras sociedades gastan para el control de estas epidemias son colosales y sobrepasan la imaginación.

58. Como lo han demostrado varios autores (**Amaranthus, M.P. & Perry, D.A.**, 1987; **Amaranthus, M.P. & Perry, D.A.**, 1988; **Bormann, F.H. & Likens, G.E.**, 1979; **Flaig, W.**, 1972; **Gosz, J.R. & Fischer, F.M.**, 1984; **Gosz, J.R., Holmes, R.T., Likens, G.E. & Bormann, F.H.**, 1978; **Martin, W.C., Pierce, R.S., Likens, G.E. & Bormann, F.H.**, 1986), es posible hacer cambios muy importantes en el comportamiento de los ecosistemas, ya siendo hacer variar los factores biológicos que tendrían un impacto importante sobre los nutrientes, ya sea en la forma de estos últimos, en cuyo caso las repercusiones físico-químicas son inconmensurables.

59. De esto, concluimos que hay una relación directa entre los parámetros biológicos y la disponibilidad de nutrientes. Se conocen las relaciones químicas y físicas, pero aquellas en los niveles químicos y bioquímicos son más oscuras y lo mismo del conocimiento específico de los mecanismos de transferencia de energía.

60. Mis reflexiones sobre los medios tropicales a la luz de los descubrimientos impresionantes, donde la presencia del dosel de los árboles del bosque pluvial está siempre asociada a unos suelos relativamente pobres, abren la puerta a nuevos conocimientos fundamentales. Estos descubrimientos sugieren que la estructuración de la vida de los ecosistemas reposa únicamente en mecanismos dependiente del bosque y, accesoriamente, en los mismos árboles. Sería ésta la causa de la precariedad africana, donde es difícil de producir suficientes alimentos para mantener un nivel de vida decente y estable.

2. El ciclo biológico del agua en clima tropical

61. Proponemos ahora nuestra cuarta hipótesis: (4) *El ecosistema hipogeo, esto es el suelo viviente, ha sido capaz de sobreponerse a todas las dificultades debidas al clima, creando una red de múltiples formas de vida, en la cual los nutrientes pueden ser recuperados por las plantas sin necesidad de los ciclos químicos que la agricultura privilegia y desarrolla en clima templado. Este hecho sería particularmente importante en la gestión del agua, ya que el agua se comportaría como un nutriente, insensible a la presión osmótica del suelo causada por las grandes concentraciones de sales.* Las observaciones preliminares, hechas tanto en Quebec como en Senegal, muestran mayores producciones y consumos de agua muy reducidos. Nos basamos para nuestra hipótesis en estas observaciones puesto que, aunque el fenómeno se repite, es insólito y no hemos podido encontrar ninguna explicación convincente en la literatura.

3. Los nutrientes "químicos"

62. En cuanto a los nutrientes, por lo menos en cuanto al nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio, no solamente no hemos observado carencias [en nuestros suelos tratados] sino que, por el contrario, hemos encontrado mejoramientos sensibles de las reservas, particularmente en el caso del fósforo.

4. Nitrógeno

63. Al inicio, asumimos que el nitrógeno encontrado en el suelo era el resultado directo de la degradación de las proteínas y de la biomasa microbiana. Sin embargo, ya que las plantas no mostraban signos de carencia luego de tres años, nos vimos en la obligación de buscar la causa. Siguiendo a numerosos autores, llegamos a la conclusión que los mecanismos causales eran de origen forestal, principalmente asociados a una fijación del nitrógeno bajo forma no simbiótica a través de una variedad de bacterias en la rizósfera. Citamos, a título de referencia, los siguientes autores: Dommergues, Y. & Bauzon, D. (1975), Rouquerol, T., Bauzon, D. & Dommergues, Y. (1975), Thomas-Bauzon, D., Weinhard, P., Villecourt, P. & Balandreau, J. (1979), Thomas-Bauzon, D., Weinhard, P., Villecourt, P. & Balandreau, J. (1982), Thomas-Bauzon, Kiffer, E., Pizelle, G. & Petitdemange, E. (1990), Thomas-Bauzon, D., Kiffer, E., Janin, G. & Toutain, F. (1995), Parkinson, D. (1988), Stott, D.E., Kassim, G., Jarrell, M., Martin, J.P. & Haider, K. (1993), Swift, M.J. (1976), Tate, R.L. (1987), Vaughan, D. & Ord, B.C. (1985).

64. En general, parecería que la regla general de la fijación del nitrógeno reposaba sobre un grupo de bacterias cuya enzima activa contenía hierro como elemento central, similar a la estructura de la hemoglobina. Bien diferente de las Leguminosas con sus *Rhizobium*, esto explicaría la abundancia de nitrógeno en los suelos forestales lo mismo que en los tratados con MRF. Sobre esta base, proponemos la siguiente hipótesis: (5) *El ciclo del nitrógeno es alimentado principalmente por la*

fijación microbiana de N₂, y accesoriamente por la acción de los hongos y de las micorrizas, en suelos tratados con MRF.

5. El fósforo

65. Este elemento siempre ha sido un problema en la nutrición de las plantas, a causa de los aspectos fugaces de su disponibilidad. Su inmovilización por el hierro en medio ácido, y por el calcio en medio alcalino, hace casi imposible que forme parte de la solución del suelo. Y, sin embargo, es un elemento vital y volátil únicamente en medios agrícolas. Los medios forestales no presentan ninguna carencia en fósforo. Sabemos que una enzima particular, la fosfatasa alcalina, es capaz de "desalojar" este elemento esencial para la transferencia de energía a beneficio del crecimiento de las plantas. Igualmente, se reconoce que una buena micorrización aumenta la disponibilidad del fósforo (**Rouquerol, T., Bauzon, D. & Dommergues, Y.**, 1975).

66. Algunos estudios no publicados muestran un aumento de la fosfatasa alcalina a partir del aumento de la biomasa microbiana en suelos agrícolas tratados con MRF. Otro estudio, que trata de investigar sobre las enzimas disponibles en la MRF, revela la presencia notable de tanto la fosfatasa alcalina como de la fosfatasa ácida en las ramitas *Quercus rubra*, que es una de las especies más promisorias en nuestras condiciones climáticas. Es demasiado pronto para sacar conclusiones acerca de la presencia de estas y otras enzimas, como una lipasa. Esperamos poder publicar estos resultados próximamente lo que abriría un nuevo campo de reflexión sobre los múltiples procesos de la pedogénesis. No he podido hacer una revisión bibliográfica tan profunda como en el caso del nitrógeno, pero podemos tener en cuenta los siguientes autores: **Flaig, W.** (1972), **Ratnayake, M., Leonard, R.T. & Menge, J.A.** (1978), **Swift, M.J., Heal, O.W. & Anderson, J.M.** (1979), **Vaughan, D. & Ord, B.G.** (1985). Ahora podemos presentar otra hipótesis: (6) *La MRF no solamente contribuye con nutrientes al suelo, sino que también con diversos mecanismos que regulan la síntesis o liberación de ellos.*¹²

67. Los resultados tanto de los experimentos forestales como agrícolas nos han llevado a explorar su impacto (de la MRF) sobre la nutrición, aún reconociendo que la respuesta no podría ser global, y que su conocimiento cualitativo y cuantitativo no podría aportar nada de concluyente. El conjunto de los resultados experimentales preliminares no han hecho más que ponernos sobre pistas frecuentemente desconocidas e insólitas en la literatura actual. Podemos citar aquí los principales trabajos realizados en el campo de la experimentación con MRF: **Beauchamp, C.** (1993), **Guay, E., Lachance, L. & Lapointe, R.A.** (1982), **Larochelle, L., Pagé, F., Beauchamp, C. & Lemieux, G.** (1993), **Lemieux, G. & Lapointe, R.A.** (1985), **Lemieux, G. & Lapointe, M.** (1993), **Pagé, F.** (1993), **Seck, M.A.** (1993), **Seck, M.A. In Lemieux, G.** (1994), **Toutain, F.** (1993), **Tremblay, Y.** (1985). Estas publicaciones, que han aparecido durante los últimos diez años, han atraído, hasta ahora, sólo un limitado grado de curiosidad, y esa solamente desde el tradicional punto de vista de aquellos interesados en técnicas agrícolas empíricamente probadas para extraer nutrientes de los desechos de los cultivos.

69. Nos hemos visto así forzados a realizar una revisión amplia para comprender la ausencia de atractivo científico de nuestros descubrimientos lógicos, pero desconcertantes desde un punto de vista tanto económico como técnico.

VII. Un primer ensayo de síntesis

1. Demasiado agua o demasiado poca

69. Luego de haber obtenido, a través de los años, resultados repetidos de nuestra investigación, hemos llegado a considerar la MRF bajo el ángulo de una substancial "nutricional", identificable por sí misma, bajo la forma de un complejo organo-mineral a través de despolimerización, retrosíntesis, degradación y combustión enzimática. La presencia de agua es un factor clave del sistema. Ya que es imposible que la lignina se despolimerice en agua, esto es, sin oxígeno, el agua muy bien pudiera ser la causa de los bloqueos que observamos en esas condiciones, tanto en silvicultura como en agricultura. Los mejores rendimientos siempre se obtienen en suelos mésicos y bien drenados, pero sin exceso.

70. Así, la lignina que apenas evoluciona producirá taninos y polifenoles cuando se acumula en los tejidos vegetales, y puede conservarse en las turbas durante períodos que exceden los mil años. Por el otro lado, si el agua es deficitaria y se previene la evolución de los tejidos vegetales, ellos tenderán a acumularse en la superficie, frecuentemente con grandes concentraciones de polifenoles, la mayoría sintetizados por las mismas plantas (ejemplo, las Dicotiledóneas). Esta situación es frecuente bajo nuestras condiciones de clima templado, donde la estructura geológica es altamente porosa o su pendiente es muy pronunciada. La situación es diferente en los trópicos donde la disponibilidad de agua depende más directamente del patrón de lluvia.

71. Una distribución uniforme, pero deficiente, de agua sobre las formaciones geológicas de origen sedimentario, ricas en calcio, facilitará la profusión de las Monocotiledóneas en los suelos profundos. Pero debido a que tales suelos carecen de una estructura real, ellos se mostrarán inestables en la presencia de agua excesiva. A la inversa, en período de déficit de precipitaciones, estos suelos son muy susceptibles a la erosión eólica, como ha sucedido muchas veces en las praderas centrales de América del Norte.

2. El papel estructurante de la lignina

72. En este último caso, la inestabilidad del suelo se debe, probablemente, al resultado directo de la estructura en sí de la lignina, y de los grupos metoxilos que ella puede contener. Al mismo tiempo, tales suelos son, con frecuencia, bien apropiados para los grandes cultivos de Monocotiledóneas, aunque sus producciones tienden a ser bajas. El laboreo mecánico de estos suelos tiende a dañar su estructura y acelera su metabolización, a menos que las pérdidas puedan ser reemplazadas.

73. Podemos ahora proponer la siguiente hipótesis: (7) *El origen de la lignina, y la posición y número de grupos metoxilos en ella, serían responsables de la estructura del suelo en función de su régimen hídrico y de los patrones de lluvia.*

3. El papel de las cadenas tróficas

74. Si esta hipótesis pudiera verificarse, tendríamos una explicación de los fenómenos que hacen que la vegetación es tan frágil en los climas tropicales y, particularmente, en condiciones sahelianas. La competencia para buscar agua puede deberse al colapso de los sistemas telúricos vivientes, donde el agua se comporta justo como los otros nutrientes, al abrigo de los limitantes químicos y biológicos que prevalecen en el suelo sometido a altas temperaturas cotidianas. Esta podría ser la respuesta a nuestras observaciones de que en presencia de un sistema biológico activo y equilibrado, tengamos aumentos de rendimiento y disminución de las necesidades de agua para el crecimiento. Estas observaciones son válidas tanto en climas templados como en tropicales.

75. Estas observaciones nos permiten formular una segunda hipótesis que pudiera dar más luz sobre la interpretación de nuestros resultados: (8) ***La biodiversidad y la calidad de vida del suelo serían los principales agentes de conservación y uso del agua almacenada y disponible en el interior de los sistemas biológicos al abrigo de los ciclos químicos del suelo.***

4. Viviendo más allá de las limitaciones químicas del suelo

76. Creemos que esta es una hipótesis altamente plausible, en vista de la capacidad que el bosque ha desarrollado a lo largo de millones de años para cortocircuitar los efectos dañinos y destructivos de los productos químicos producidos por la vegetación del sistema epigeo. Tendríamos así una explicación lógica de la degradación de los suelos, tributarios en un primer tiempo de la biodiversidad iniciada y mantenida por el bosque, y que una vez que ha desaparecido el bosque, no fueron suficientemente nutridos para ser productivos. Desde esta perspectiva, el suelo viene a ser el centro de la vida encargándose del almacenamiento, la liberación y la puesta a disposición de los nutrientes "demandados" por las plantas mismas.

77. Para que tal posibilidad se pueda realizar, es indispensable que haya una fuente estable de energía, una fuente que es altamente diversificada y que contiene sustancias que son compatibles con el sistema. Esta amplia diversidad solamente se encuentra en la madera rameal, mientras que el tallo caulinar es deficitario en muchos aspectos además de poseer una lignina altamente polimerizada. Las dos fuentes primarias utilizables son los aminoácidos y proteínas, paralelamente con los azúcares. Luego se encuentra el conjunto de las celulosas, las hemicelulosas y, para terminar, la lignina y sus derivados.

78. Ahí tenemos una lista de productos energéticos y utilizables en todo o en parte por los diferentes niveles tróficos capaces de crecer y de permitir la reproducción de los diferentes tipos de vida. La lignina será igualmente un elemento de los más importantes, participando, además de su papel en la cadena energética, en la constitución física del suelo por la reducción y la concentración de los núcleos bencénicos, la base misma de la estructuración del suelo cuando se convierte en ácido húmico.¹³ Esta relación entre los nutrientes y la fracción mineral del suelo está asegurada por la lignina y sus derivados húmicos, por la formación de los agregados y la quelación del hierro.

79. Estos agregados juegan un papel primordial en la fertilidad del suelo en cuanto que ellos constituyen la base de la estructura del suelo, su atmósfera, etc., y al mismo tiempo son una fuente de nutrición para los microorganismos. Por lo tanto, ellos tendrán una vida relativamente corta y deberán ser reemplazadas continuamente. También suministran refugio a los microorganismos como bacterias o varias formas enquistadas, mientras sirven como una fuente de energía y de nutrientes.

5. La causa principal de la degradación de los suelos tropicales

80. Como nuestras mediciones y observaciones necesitan de interpretaciones, hemos optado por una interpretación forestal a la luz de lo que hemos descrito. Así, proponemos la siguiente hipótesis: (9) ***La MRF puede ser una fuente de nutrientes y de energía, con la lignina como el principal factor de estabilidad y de control del suelo, con la condición de estar en la forma de oligómeros fácilmente despolimerizables por los Basidiomicetos. Los productos así obtenidos pueden ser usados fácilmente por los sistemas biológicos, o puede ser retrosintetizados, o convertidos en***

humus, que es la base misma de la fertilidad del suelo, de la gestión de los nutrientes y de la constitución de las reservas energéticas del suelo.

81. Visto desde este ángulo, la desaparición del bosque y de todos los mecanismos que dependen de la presencia de la lignina y de los procesos de transformación de ella resulta ser una gran catástrofe. [Cuando los bosques son destruidos para dar paso a la agricultura, el resultado inmediato e inevitable es] la pérdida de suelo y las caídas dramáticas de los rendimientos de los cultivos. La aplicación de abonos minerales no es de ayuda en este caso; por el contrario, ocasiona descensos de la producción todavía más importantes. En cuanto a esto, la introducción de métodos occidentales de cultivo fueron una verdadera catástrofe la cual todos denuncia pero sin aportar alguna solución.

82. Ahora proponemos la hipótesis siguiente: (10) ***Ya que los mecanismos responsables de la fertilidad de los suelos son universalmente de origen forestal, la desaparición del bosque llevará a corto, mediano o largo plazo, a una caída de la fertilidad y de la productividad. El uso de productos químicos como fertilizantes tiene como consecuencia acelerar el colapso de la estructura del suelo y la aparición de carencias y de parásitos.***

83. El problema de la degradación del suelo va más allá de la simple disponibilidad de nutrientes. Cuando los suelos tropicales se degradan, ellos pierden la energía endógena necesaria para regular el flujo de nutrientes y de agua. En climas tropicales, los nutrientes están almacenados en las ramas de los árboles más que en el suelo mismo. Todos los intentos para compensar usando fertilizantes químicos en suelo desprovisto de su energía están condenados al fracaso como la historia reciente nos lo ha demostrado.

6. La base del funcionamiento de los ecosistemas forestales

84. A medida que avanzamos en la comprensión de los mecanismos responsables de la vida y de la fertilidad, podemos empezar a distinguir los diferentes roles más claramente. Resulta evidente que, en todas partes y en todos los tiempos, que el suelo, su biología, y su equilibrio químico y bioquímico son la clave de todo el edificio forestal. La alusión que he hecho al inicio del presente documento en cuanto al origen del bosque en el tiempo refuerza la idea que todos los mecanismos causales tienen un origen que se remonta a centenas de millones de años. El hecho que nosotros los humanos nunca hayamos tenido el apropiado cuidado de estos mecanismos dice mucho sobre nuestro antropocentrismo.

85. La descripción que hemos presentado se aplica a todos los ecosistemas forestales, pero son los tropicales los que son más dependientes de ella y los más sofisticados, a causa de las altas temperaturas o la ausencia prolongada de variaciones térmicas o hídricas. Nos parece que la cuestión energética está en el centro de la cuestión ya que ella está bajo una forma nutricional, es decir, donde la energía exógena puede ser introducida en los ciclos vitales y asociarse a los nutrientes bioquímicos (azúcares, grasas, aceites, etc.), los cuales a su vez pueden ser por sí mismos portadores de energía endógena.

86. Así, de 70% a 80% de la energía endógena producida por un árbol es dirigido directamente en el ecosistema del suelo, dejando solamente de 20% a 30% de la energía total para la producción de tejidos (Fogel, R. & Hunt, G., 1983; Meyer, J.R. & Linderman, R.G., 1986; Rambelli, A., 1983;

Reid, C.P.P. & Mexal, J.G., 1977; Vogt, K.A., Grier, C.C., & Meir, C.E., 1982; Whipps, J.M. & Lynch, J.M., 1986). En el caso de las gramíneas, apenas de 10% a 40% de la energía total es dirigida hacia el ecosistema hipogeo.

87. Es así que la energía endógena es dirigida hacia el ecosistema hipogeo (el suelo) por vía de las raíces, donde las micorrizas, además de ser ellas mismas unas grandes consumidoras, juegan un papel importante asegurando el transporte de los nutrientes del suelo hacia la planta y devolviendo al suelo la energía que éste necesita. Es a través de sus relaciones con los hongos, generalmente Basidiomicetos, que se traba principalmente la nutrición de la planta y los intercambios con el suelo (Allen, T.F.H. & Starr, T.B., 1982; Amaranthus, M.P., Li, C.Y. & Perry, D.A., 1987; Amaranthus, M.P. & Perry, D.A., 1987; Anderson, J.M., Huish, S.A., Ineson, P., Leonard, M.A. & Splatt, P.R., 1985; Borchers, S. & Perry, D.A., 1987; Clarholm, M., 1985; Coleman, D.C., 1985; Fogel, R. & Hunt, G., 1983; Hogberg, P. & Pearce, G.D., 1986; Ingham, R.E., Troffymow, J.A., Ingham, E.R. & Coleman, D.C., 1985; Janos, D.P., 1980; Lynch, J.M. & Bragg, E., 1985; Malloch, D.W., Pirozynski, K.A. & Raven, P.H., 1980; Meyer, F.H., 1985; Meyer, J.R. & Linderman, R.G., 1986; Olsen, R.A., Clark, R.B. & Bennet, J.H., 1981; Perry, D.A., Molina, R. & Amaranthus, M.P., 1987; Rambelli, A., 1973; Reeves, F.B., Wagner, D., Moorman, T. & Kiel, J., 1979; St-John, T.V. & Coleman, D.C., 1982; Trappe, J.M., 1962; Vogt, K.A., Grier, C.C., & Meier, C.E., 1982; Whipps, J.M. & Lynch, J. M., 1986).

88. En muchas ocasiones hemos hecho alusión a la importancia de la lignina en la constitución del suelo y en la gestión de los nutrientes por los diferentes niveles tróficos. En los bosques de Dicotiledóneas, se encuentran dos fuentes de lignina con aprovisionamiento regular: la primera está representada por la caída de tejidos ricos en lignina poco polimerizada a partir del dosel que representan las hojas, los frutos, las pequeñas ramitas de todas clases, etc. La segunda fuente, todavía más importante aunque no visible, reside en todas las pequeñas raíces que son constantemente metabolizadas. Ellas son muy ricas en lignina poco polimerizada y son apetecibles para la microfauna. En un rodal de arce azucarero, hemos estimado la producción anual por hectárea de biomasa en la forma de raicillas entre 2 y 3 toneladas por año (Pagé, F., 1993).

7. El papel de la madera rameal al nivel de la pedogénesis

89. Los resultados obtenidos en los medios agrícolas y forestales mostraron, desde los inicios, unos resultados que han sido verificados subsiguientemente: Aman, S., Despatie, S., Furlan, V. & Lemieux, G., 1996; Beauchamp, C., 1993; Guay, E., Lachance, L. & Lapointe, R.A., 1982; Lemieux, G. & Lapointe, R.A., 1985; Lemieux, G. & Lapointe, R.A., 1986; Lemieux, G. & Lapointe, R.A., 1988; Lemieux, G. & Lapointe, R.A., 1989; Lemieux, G. & Lapointe, R.A., 1990; Lemieux, G. & Tétreault, J.P., 1993; Lemieux, G. & Toutain, F., 1992; Lemieux, G., 1995; Seck, M.A., 1993. Todos los resultados, reproducibles con fidelidad variable según las fluctuaciones anuales de las condiciones del medio, nos han mostrado unos resultados positivos en la mayoría de los casos. Cuando se ha encontrado fracasos, hemos podido identificar los errores cometidos y proponer una explicación satisfactoria, confirmando así numerosos principios básicos.

90. Podemos ahora formular la hipótesis siguiente: (11) *La madera rameal fragmentada, cuando se expone al ataque por Basidiomicetos, puede remplazar todas las funciones biológicas que requieren el aporte de nutrientes químicos y bioquímicos. La MRF también contiene la energía necesaria para asegurar tanto la dinámica como el tributo que toda vida debe pagar a la entropía. La emisión de energía cubre parcial o total el espectro electromagnético.*

8. La segunda ley de la termodinámica: la entropía y la biología del suelo

91. Muchas de nuestras observaciones y reflexiones relacionadas con los aspectos energéticos de la vida del suelo no han encontrado todavía eco en la literatura reciente. Siempre nos ha sorprendido la inhibición de la productividad en las áreas tropicales, donde los suelos son degradados, y en los climas subárticos donde, por el contrario, hay una sobrecarga de tejidos vegetales poco evolucionados y poco productivos en cuanto a la biomasa anual.

92. La rápida transformación de la MRF en clima tropical y el estancamiento en medio ártico parecen deberse, en ambos casos, a una inversión de la distribución de la energía exógena, es decir, proveniente del sol. En ambos casos, el sol es incapaz de pagar su tributo a la entropía emitiendo energía radiante. Este razonamiento nos lleva directamente al corazón de la cuestión energética, acerca de la cual nuestra comprensión aumenta actualmente muy rápidamente como resultado de los grandes descubrimientos de los sistemas estelares. Un mejor conocimiento de la materia es la clave para una mejor comprensión. Así, la constitución del universo y la relación entre todos sus componentes en forma de un continuo cubre el conjunto del espectro electromagnético desde los quarks hasta las moléculas. De aquí, la continuación es previsible con las macromoléculas, los virus, las células, los tejidos y las especies siendo los menos numerosos las más evolucionados (Reeves, H., 1992; Prigogine, I. & Stengers, I., 1984).

93. Nadie negaría de que una de las características que diferencia la vida y la muerte es la emisión de calor. Este fenómeno implica la necesidad de la presencia de una fuente energética endógena que solamente puede manifestarse en presencia de una cantidad necesaria de energía exógena (temperatura ambiente).

94. Más que la cantidad de fertilizantes para definir la fertilidad de un suelo, es la energía endógena el factor determinante. Sin embargo, la evolución de los polifenoles es susceptible de bloquear esta energía necesaria; de ahí la pérdida de energía, aún en presencia de energía endógena. Este es el caso de los suelos orgánicos en medios árticos, limitados tanto por una carencia de energía exógena como por los polifenoles y taninos *sui generis* como resultado final de la evolución.

95. En medios tropicales, me parece que la degradación de los suelos está más bien ligada a la ausencia de energía disponible a causa de la sobreabundancia de energía exógena que fuerza al metabolismo del ecosistema a consumir todo en poco tiempo, no dejando más que unas formas de vida poco activas y poco productivas.

96. Es así que el bosque tropical por sí solo ha desarrollado las herramientas para evitar los inconvenientes de la hiperactividad metabólica del suelo, limitando la disponibilidad de nutrientes bioquímicos, lo que bloque el acceso a las fuentes energéticas endógenas que beneficiarían sobre todo al ecosistema hipogeo en detrimento del epigeo. Desde este punto de vista, la acumulación constante de tejidos vegetales caídos, ricos en nutrientes y lignina, la emisión de la mayoría de su productividad hacia el suelo, y la transformación de la lignina del sistema radical permiten abastecer la energía necesaria por el suelo. Así, siendo muy rápido el metabolismo bajo estas condiciones, el mismo árbol se convierte en el depósito de nutrientes, lo que permite una vida limitada pero activa del ecosistema hipogeo.

97. Bajo estas circunstancias, las demandas de la entropía deben ser cumplidas por los árboles y luego por el suelo en general. Así se comprende mejor el por qué la desaparición de los árboles

luego de la explotación del bosque, con frecuencia por razones industriales, resultan catastróficas, dejando detrás solo suelos pobres y poco fértiles para la agricultura, como es el caso en el continente africano en particular.

98. Proponemos ahora la siguiente hipótesis: (12) *La madera rameal aporta con ella una energía endógena que permite cumplir con las demandas inevitables de la entropía permitiendo el acceso a los diversos nutrientes. Igualmente, aporta los mecanismos enzimáticos necesarios para sintetizar esos nutrientes o hacerlos accesibles.*

9. Los aspectos nutricionales de la MRF

99. Esta hipótesis implique que la MRF debe percibirse primeramente, y sobre todo, como un "alimento" completo, en el cual tanto los nutrientes como la energía están íntimamente asociados. Con la formulación de esta idea, estamos conscientes de que va en contra de la corriente del conocimiento convencional que ha permitido que la agricultura se haya desarrollado con aumentos no conocidos previamente en el rendimiento. También estamos conscientes de que se necesitan varias décadas para que podamos cambiar las percepciones básicas de la industria responsable de los fundamentos de la vida sobre la tierra. Aún así, estamos convencidos que esta hipótesis puede, y debe, conducir a cambios profundos en la ecología y economía de un gran número de países, principalmente en los climas tropicales.

100. La eficacia de la MRF para modificar a profundidad el medio agrícola, a través de aumentos en la productividad, nos la presente bajo el aspecto de un "alimento", lo que confiere al suelo un carácter viviente, pero de facetas múltiples. En el suelo, la vida es altamente diversificada, intrincada, compuesta de todos los niveles posibles, cada uno dependiendo de los otros. Aquí la vida y la muerte están por igual estrechamente asociados en la gestión de los nutrientes químicos, y cuya estructura general estará asegurada por la evolución de la lignina y de los polifenoles.

101. Más aún, es notable que un gran número de mecanismos físico-químicos, químicos y bioquímicos sustentan estos equilibrios. Mencionemos la quelación de los metales pesados, entre ellos el hierro, la regulación de la disociación de los iones de hidrógeno e hidroxilos, la producción de sistemas proteicos, siempre reversibles con enzimas que participan en la alimentación nitrogenada y fosfatada. Esta reversibilidad es la base misma de la regulación pero, en el caso del suelo, estos mecanismos no son únicos. Hay otro mecanismo regulador donde la vida misma interviene con la emisión de energía acumulada en su propia masa dando un conjunto de elementos suplementarios que a su vez también son reversibles, creando una estructura o atmósfera controlada que contiene muchos factores de inhibición biológica del tipo de los polifenoles.

10. La pedogénesis en el bosque de Gimnospermas

102. Esta reversibilidad de los "fenómenos íntimos de la pedogénesis" es la esencia de la vida misma donde los nutrientes están asociados a la energía que puede ser liberada de nuevo a través de la degradación biológica. Hay muchas preguntas que podrían hacerse acerca de la noción de calidad de este "alimento", su homogeneidad o, a la inversa, su gran diversidad. Así, hemos observado grandes diferencias en el comportamiento de las especies utilizadas para la producción de MRF. El primero punto concierne a las Gimnospermas (coníferas) y las Angiospermas Dicotiledóneas (caducifolias leñosas) en cuanto a la eficacia de la transformación en el suelo, presentando las primeras bloqueos que impiden toda evolución favorable a la estructuración del suelo, lo mismo que al crecimiento y la germinación de las plantas. Las poblaciones de Gimnospermas habrían

verdaderamente establecido un sistema restrictivo por eliminación de la competencia, basada principalmente en los efectos inhibidores de los polifenoles. Aquí, la lignina muestra una estructura asimétrica con la presencia de solamente un grupo metoxilo. Ella da origen a numerosos polifenoles, ácidos grasos, resinas, terpenos, etc. haciendo ineficaz el papel de ciertas lipasas que puedan estar presentes. Muchas especies de la familia de las Umbelliferae lo mismo que de las Labiatae han conservado en las Angiospermas este carácter propio de las Gimnospermas. Lo mismo es en cuanto a los *Eucalyptus* australianos que practican la exclusión de la competencia, fenómeno devastador en el cultivo de estas especies en relación a la agricultura.

11. La pedogénesis bajo los bosques de Angiospermas Dicotiledóneas

103. Por el contrario, las especies de las Angiospermas Dicotiledóneas parecen haber recurrido a lo opuesto, aceptando y promoviendo la llegada de numerosas especies, asegurando la complementariedad de cada una. Esta es una estrategia basada en la biodiversidad y la complementariedad, pero no todas las especies son iguales entre ellas. Habría que hacer muchos trabajos exploratorios para comprender y ver las acciones específicas en el interior de los mecanismos pedogenéticos. Nuestros experimentos sobre germinación de árboles durante un período de cinco años (Lemieux, G. & Lapointe, R.A., 1989) nos confirmó claramente este punto. Lo mismo puede decirse de los experimentos con maíz en Costa de Marfil (Aman, S., Despatie, S., Furlan, V. & Lemieux, G., 1996), donde la comparación sistemática de las producciones cuatro especies diferentes mostraron variaciones notables. Resultados similares se encontraron en Senegal, en la región de Ziguinchor, donde se observaron efectos específicos con *Acacia mangium*, *Guiera senegalensis* y *Combretum micranthum* (Lemieux, G., 1994).

104. Estos dos modos de gestión de la competencia, uno arcaico y el otro más "moderno", nos han sugerido la hipótesis siguiente: (13) ***La estructura de la lignina y su evolución en el conjunto de los mecanismos pedogenéticos son responsables directos de la forma de competencia en los ecosistemas, debido a la manera en que evoluciona en el suelo, y sus efectos sobre el control de los nutrientes químicos y bioquímicos.***

12. Origen y distribución de los suelos apropiados para la agricultura

105. Esta hipótesis está relacionada con otra que formularemos más adelante en lo que concierne a la evolución de la agricultura. Observaciones hechas recientemente en la República Dominicana (Lemieux, G., Marcano, J. & Gonzalez, A., 1994) indican que aún en los trópicos, los suelos de bosques de coníferas (*Pinus occidentalis*) no son apropiados para la agricultura, al igual que en las regiones de clima templado. Desde hace mucho, habíamos asumido que los suelos de bosques de coníferas eran impropios para la agricultura a causa de la pluviometría, el número de días sin escarcha, pH demasiado bajo o demasiado alto, pobre estructura del suelo, una roca madre demasiado porosa, etc. Ahora creemos que, aún cuando estos criterios sean correctos, la razón fundamental reposaría sobre todo sobre el tipo de pedogénesis que promueve suelos polifenólicos y que elimina, para todos los fines prácticos, la competencia, permitiendo solamente a algunas especies especializadas en este tipo de medio, las cuales crecen en grandes concentraciones.

106. Estos comentarios y observaciones abren la puerta a otra hipótesis que vendría a confirmar la importancia del tipo de lignina sobre los mecanismos pedogenéticos. Una revisión del desarrollo de los poblamientos humanos dependientes de la agricultura ha mostrado que la transformación de los suelos del bosque latifoliado la que ha dado nacimiento a una agricultura que permite la acumulación de riquezas y de bienestar, desde los inicios de la humanidad. Es en este medio forestal latifoliado que aparentemente se desarrolló la humanidad, en Africa oriental, hace un millón de

años. ¡Esto no fue ciertamente un accidente! Observaciones similares se pueden hacer para Europa, Asia y América.

107. Toda Africa está bajo el dominio del bosque latifoliado, mientras que, en las mismas latitudes, la América Latina es más diversa con varios ecosistemas de coníferas.¹⁴ Es así que hemos podido tomar conciencia de las diferencias entre los ecosistemas latifoliados y los de coníferas, y una revisión de los trópicos nos ha confirmado que es el bosque latifoliado el que ha producido los terrenos apropiados para la agricultura. Observamos el mismo patrón en latitudes más al norte tanto en América como en Europa y Asia. Se presenta automáticamente la cuestión de saber el por qué los suelos africanos, originarios del bosque latifoliado, son tan poco productivos. La respuesta, tal como la vemos, tiene que ver con el colapso de los mecanismos pedogenéticos, especialmente los de origen biológico, aún cuando generalmente se ha buscado la respuesta por el lado de los mecanismos químicos y físicos.

108. Así formulamos la siguiente hipótesis: (14) *Los mecanismos pedogenéticos encontrados en los bosques de latifoliadas está claramente relacionados con la estructura de la lignina, permitiendo un reciclaje armónico de los nutrientes y de vastas adaptaciones, y una productividad sin igual. Así, en el bosque de latifoliadas encontraremos un tipo climácico de bosque, con árboles de varias edades y numerosas especies, mientras que en los bosques donde dominan las Gimnospermas hay poca oportunidad para la regeneración o renovación y solamente unas pocas especies pueden sobrevivir. Los bosques de latifoliadas han permitido la invención y la perdurabilidad de la agricultura por todo el planeta.*

13. Algunas reflexiones sobre la madera rameal

109. Fue la idea de aumentar la productividad por medio de mecanismos ecológicamente armónicos que nos llevó a considerar la MRF como un factor "nutricional" básico en la agricultura, dentro del contexto global de causas y factores de la pedogénesis. Ya que la MRF ha demostrado resultados beneficiosos tanto en suelos forestales como agrícolas, hemos concluido en que ella puede ser la base de un nuevo campo de conocimiento, uno que, como lo demuestra la literatura del pasado siglo, nunca ha sido enfrentado bajo este ángulo.

110. Estos resultados sacan a la luz la importancia de los mecanismos de origen forestal que gobiernan tanto la estructura como la fertilidad y la productividad del suelo. Por lo tanto, podemos sugerir la siguiente hipótesis: (15) *Los suelos agrícolas derivados del bosque de latifoliadas, en todas las latitudes, pueden ser considerados como suelos forestales degradados por las necesidades de los hombres. La aplicación de la MRF permite recuperar la fertilidad, activando los mecanismos de regeneración y favoreciendo la gestión y el control de las cadenas tróficas lo mismo que la estructura del suelo.*

111. Estamos persuadidos que tal declaración será recibida con algunas dudas en un primer tiempo pero que, frente a los hechos, deberán desaparecer poco a poco. Constantemente nos sorprendemos por el enfoque "agrícola" de la silvicultura moderna, y por las concepciones y adaptaciones industriales de la agricultura a las necesidades de la humanidad. Proponemos, por medio de los nuevos conocimientos que aportamos, mirar a los suelos agrícolas desde la perspectiva de sus mecanismos pedogenéticos, primeramente los biológicos, luego los bioquímicos y finalmente los químicos y físicos. Las técnicas relativas a los suelos agrícolas deberían tener desde los inicios una

consideración nutricional más que química, hidrodinámica, fisico-química u otra.

112. Numerosas pistas falsas han sido seguidas a lo largo del último siglo, ellas han limitado la reflexión por la utilización de sistemas cada vez más artificiales, basados en los dos conceptos de "nutrición mineral de las plantas" y "materia orgánica".

113. El primero de estos conceptos ha hecho posible acumular un número incalculable de datos científicos, verificables matemáticamente, y que han aportado una verdadera revolución social en todo el mundo. Sin embargo, hay que reconocer que hemos alcanzado un techo desde el punto de vista económico y que todas las medidas de artificialización están provocando que los costos se disparen y limiten el acceso a las producciones, y aún impidiéndolo.

114. El segundo concepto es todavía mucho más pernicioso, en cuanto que no se puede definir químicamente y siempre da resultados difíciles si no imposibles de repetir, mostrando así la debilidad del concepto. La agricultura orgánica, que representa un retorno a tradiciones pasadas, se ha vuelto de moda, y por todas partes se promueve el uso y la fabricación de "compost" y estiércol. Pero esto es realmente equivalente a promover la mineralización para beneficios a corto plazo. La reacción de los africanos, en lo que se refiere a la materia orgánica, se ajusta totalmente a la visión de desecho de los países del norte: *nosotros no tenemos de ella, y cuando tenemos de ella, es inmediatamente consumida en el suelo*. Parecería que el futuro "orgánico" es altamente precario bajo tales condiciones, especialmente desde que las reservas de desechos "compostables" son inciertas y limitadas, y el proceso representa una pérdida considerable de energía, la cual pudiera ser introducida directamente en el mismo sistema del suelo.

115. Estas son las razones por las cuales proponemos la técnica forestal de producción de MRF que sería usada para llenar necesidades estrictamente agrícolas. Es técnicamente posible y económicamente rentable producir las cantidades necesarias de MRF para establecer los mecanismos de gestión del suelo, a partir de la biología y de la bioquímica dependiente. Más aún, creemos que con un poco de esfuerzo, será posible de convencer a los mismos agricultores a adoptar esta tecnología directamente en su cultura y tradición. Después de todo, la producción de MRF puede, y de hecho debe, ser usada en la escala en que se necesite, algo que es imposible de alcanzar por las técnicas de "compost" de desechos las cuales son demasiado costosas y reembolsan demasiado poco en función del gasto de energía humana.

14. La desertificación y la energía endógena de los suelos

116. Las propuestas que acabamos de explicar abren la puerta a una comprensión nueva de los procesos de desertificación, dejando entrever unas técnicas simples y que serían susceptibles de corregir el problema en su misma fuente. *Habría que consagrar considerables esfuerzos para hacer comprender la necesidad de devolver al suelo la energía necesaria para su conservación y para su productividad*. Sin dudas, la solución requerirá una comprensión de los mecanismos involucrados en la despolimerización de la cadena de polifenoles que dan acceso a los mecanismos de regulación, de los cuales el agua será el más apreciado. Proponemos como hipótesis que (16) *la cuestión energética a partir de la lignina y de sus derivados es la base de la lucha contra la desertificación y para restaurar la productividad de las tierras arables*.

117. Nos inclinamos a pensar que esta campaña debería ser parte de un vasto plan conjunto donde la difusión práctica se haría según las técnicas tradicionales de todos los pueblos africanos, que son

sobre todo orales. Es esencial que estas ideas sean traducida al lenguaje hablado, compatible con la comprensión tradicional. Habría que evitar la imposición *ad nominem* del discurso científico que solamente se puede comunicar por escrito y apenas accesoriamente en forma oral. La difusión debería hacerse, entonces, en las lenguas étnicas; de otra manera, la campaña de seguro fracasará.

VIII. El programa de investigación

118. El programa de investigación debería abarcar varios aspectos, incluyendo los siguientes tópicos:

- a) La cuestión energética, desde el punto de vista físico dentro del contexto de la termodinámica. Este trabajo podría ser realizado tanto en países del Norte como en países del Sur.
- b) El papel de los compuestos polifenólicos en la gestión de la energía, de su distribución y de su calidad en la gestión de los nutrientes químicos y de la formación y el mantenimiento de las cadenas tróficas.
- c) La transformación biológica de la MRF en conexión con el almacenamiento y liberación de nutrientes.
- d) Estudio y comprensión de los diferentes sistemas enzimáticos, en particular aquellos originarios de la MRF.
- e) Selección de las mejores especies de árboles para ser cultivados como fuentes de MRF.
- f) Las secuencias de aplicación de las diferentes especies, solas o en mezclas.
- g) Los períodos de aplicación en relación con las cantidades necesarias.
- h) Los métodos de fragmentación y de aplicación.

IX. Hipótesis

(1) *Si admitimos que, en ausencia de la agricultura, los bosques dominaron la Tierra por millones de años, y que una vez que el hombre hubiere removido la cubierta forestal para trabajarla, el suelo sufrió una degradación importante y una pérdida de fertilidad, entonces los mecanismos que gobiernan la fertilidad del suelo debían ser de origen forestal.*

(2) *Los mecanismos que gobiernan fertilidad, pedogénesis, biodiversidad, y productividad primaria y secundaria del suelo dependen de factores que no han sido claramente explorados en la literatura científica del siglo veinte. Por lo tanto, concluimos que solamente el productivismo era la base de todos los razonamientos.*

(3) *El concepto de madera rameal podría ser una herramienta valiosa para el estudio y la comprensión de la formación del suelo y de la dinámica que lo caracteriza, considerada sobre todo como la distribución de los nutrientes químicos esenciales para el crecimiento de las plantas.*

(4) *El ecosistema hipogeo, esto es el suelo viviente, ha sido capaz de sobreponerse a todas las dificultades debidas al clima, creando una red de múltiples formas de vida, en la cual los nutrientes pueden ser recuperados por las plantas sin necesidad de los ciclos químicos que la agricultura privilegia y desarrolla en clima templado. Este hecho sería particularmente importante en la gestión del agua, ya que el agua se comportaría como un nutriente, insensible a la presión osmótica del suelo causada por las grandes concentraciones de sales.*

(5) *El ciclo del nitrógeno es alimentado principalmente por la fijación microbiana de N₂, y accesoriamente por la acción de los hongos y de las micorrizas, en suelos tratados con MRF.*

(6) *La MRF no solamente contribuye con nutrientes al suelo, sino que también con diversos*

mecanismos que regulan la síntesis o liberación de ellos.

(7) El origen de la lignina, y la posición y número de grupos metoxilos en ella, serían responsables de la estructura del suelo en función de su régimen hídrico y de los patrones de lluvia.

(8) La biodiversidad y la calidad de vida del suelo serían los principales agentes de conservación y uso del agua almacenada y disponible en el interior de los sistemas biológicos al abrigo de los ciclos químicos del suelo.

(9) La MRF puede ser una fuente de nutrientes y de energía, con la lignina como el principal factor de estabilidad y de control del suelo, con la condición de estar en la forma de oligómeros fácilmente despolimerizables por los Basidiomicetos. Los productos así obtenidos pueden ser usados fácilmente por los sistemas biológicos, o puede ser retrosintetizados, o convertidos en humus, que es la base misma de la fertilidad del suelo, de la gestión de los nutrientes y de la constitución de las reservas energéticas del suelo.

(10) Ya que los mecanismos responsables de la fertilidad de los suelos son universalmente de origen forestal, la desaparición del bosque llevará a corto, mediano o largo plazo, a una caída de la fertilidad y de la productividad. El uso de productos químicos como fertilizantes tiene como consecuencia acelerar el colapso de la estructura del suelo y la aparición de carencias y de parásitos.

(11) La madera rameal fragmentada, cuando se expone al ataque por Basidiomicetos, puede reemplazar todas las funciones biológicas que requieren el aporte de nutrientes químicos y bioquímicos. La MRF también contiene la energía necesaria para asegurar tanto la dinámica como el tributo que toda vida debe pagar a la entropía. La emisión de energía cubre parcial o total el espectro electromagnético.

(12) La madera rameal aporta con ella una energía endógena que permite cumplir con las demandas inevitables de la entropía permitiendo el acceso a los diversos nutrientes. Igualmente, aporta los mecanismos enzimáticos necesarios para sintetizar esos nutrientes o hacerlos accesibles.

(13) La estructura de la lignina y su evolución en el conjunto de los mecanismos pedogenéticos son responsables directos de la forma de competencia en los ecosistemas, debido a la manera en que evoluciona en el suelo, y sus efectos sobre el control de los nutrientes químicos y bioquímicos.

(14) Los mecanismos pedogenéticos encontrados en los bosques de latifoliadas está claramente relacionados con la estructura de la lignina, permitiendo un reciclaje armónico de los nutrientes y de vastas adaptaciones, y una productividad sin igual. Así, en el bosque de latifoliadas encontraremos un tipo climácico de bosque, con árboles de varias edades y numerosas especies, mientras que en los bosques donde dominan las Gimnospermas hay poca oportunidad para la regeneración o renovación y solamente unas pocas especies pueden sobrevivir. Los bosques de latifoliadas han permitido la invención y la perdurabilidad de la agricultura por todo el planeta.

(15) Los suelos agrícolas derivados del bosque de latifoliadas, en todas las latitudes, pueden ser considerados como suelos forestales degradados por las necesidades de los hombres. La aplicación de la MRF permite recuperar la fertilidad, activando los mecanismos de regeneración y favoreciendo la gestión y el control de las cadenas tróficas lo mismo que la estructura del suelo.

(16) la cuestión energética a partir de la lignina y de sus derivados es la base de la lucha contra la desertificación y para restaurar la productividad de las tierras arables.

BIBLIOGRAFIA

Allen, T.F.H. and Starr, T. B. 1982 «Hierarchy: Perspectives for Ecological Complexity»,

University of Chicago Press, Chicago.

Aman, S., Depatie, S., Furlan, V. and Lemieux, G. 1996. «Effects of chopped twig wood (CTW) on maize growth and yields in the forest-savanna transition zone of Côte d'Ivoire» (En vías de publicación).

Amaranthus, M.P. and Perry, D. A. 1987. «The effect of soil transfers on ectomycorrhizal formation and the survival and growth of conifer seedlings on old, non reforested clear-cuts». *Can. Jour. For. Res.* **17**:944-950.

Amaranthus, M.P. and Perry, D. A. 1988. «Interaction between vegetation type and madrone soil inocula in the growth, survival and mycorrhizal formation of Douglas-fir». *Can. J. For. Res.*

Amaranthus, M.P. C.Y. Li and Perry, D. A. 1987. «Nitrogen fixation within mycorrhizae of Douglas-fir seedlings». Page 79 in D. M. Sylvia, L.L. Hung and J.H. Graham (eds.) *Mycorrhizae in the Next Decade: Practical Applications and Research Priorities*. University of Florida, Gainesville.

Anderson, J.M. 1988. «Spatio-temporal effects of invertebrates on soil processes». *Biol. Fertil. Soils.* **6**:216-227.

Anderson, R. V., Coleman, D.C. and Cole, C.V. 1981. «Effects of saprotrophic grazing on net mineralization» In Clark, F. E. & Rosswall, T. (eds.) *Terrestrial nitrogen cycles*. *Ecol. Bull.* **33**:210-216.

Anderson, J.M., Huish, S. A., Ineson, P., Leonard, M. A. and Splatt, P. R. 1985. «Interactions of invertebrates, micro-organisms and tree roots in nitrogen and mineral element fluxes in deciduous woodland soils». Pages 377-392 in A.H. Fitter, D. Atkinson, D. J. Read and M. B. Ushers (eds.) *Ecological Interactions in Soil*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK.

Bachelier, G. 1978. «La faune des sols, son écologie et son action». Document technique n 38. Office de la Recherche Scientifique et Technique Outremer (ORSTOM), route d'Aulnay, 93140, Bondy, France, 391 pages.

Bauzon, D., Weinhard, P., Villecourt, P. and Balandreau, J. 1982. «A more effective method for counting and isolating nitro-fixing rhizosphere bacteria». In *Non-symbiotic nitrogen fixation Newsletter*, Australia **7**:3-6.

Boddy, L. 1983. «Carbon dioxide release from decomposing wood: effect of water content and temperature». *Soil Biol. Biochem.* **15(5)**: 501-510.

Borchers, S. and Perry, D. A. 1987. «Early successional hardwoods as refuge for ectomycorrhizal fungi in clearcut Douglas-fir forests of southwest Oregon». Page 84 in D. M. Sylvia, L.L. Hung and J.H. Graham (eds.). *Mycorrhizae in the Next Decade: Practical Applications and Research Priorities*. University of Florida, Gainesville.

Borman, F.H. and Likens, G. E. 1979. «Pattern and Process in a Forested Ecosystem». Springer Verlag, New York.

Breznak, J. A. 1982. «Intestinal microbiota of termites and other xylophagous insects». *Ann. Rev. Microbiol.* **36**:323-343.

Caron, C. 1994. «Ramial Chipped Wood: a basic tool for regenerating soils». Lincoln University, IFOAM Meeting, Christchurch, New Zealand. Université Laval, Québec, 8 pages, ISBN 2-921728-07-9, 1995.

Clarholm, M. 1985. «Possible roles for roots, bacteria, protozoa and fungi in supplying nitrogen to plants». Pages 355-365 in A.H. Fitter, D. Atkinson, D. J. Read and M. B. Usher (eds.). *Ecological Interactions in Soil*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK.

Coleman, D.C. 1985. «Through a ped darkly: an ecological assessment of root-soil-microbial-

faunal interactions». Page 1-21365 in A.H. Fitter, D. Atkinson, D. J. Read and M. B. Usher (eds.). *Ecological Interactions in Soil*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK.

Dommergues, Y. et Bauzon, D. 1975. «Données récentes concernant l'influence des mycorhizes sur l'absorption minérale et organique chez les plantes». *Sci. Sol.* **1**:19-28.

Dordick, J. S., Marletta, M. A. and Kilbanov, A.M. 1986. «Peroxidases depolymerise lignin in organic media but not water». *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **83**:6255-6257.

Erikson, K.E.L., Blanchette, R.A. and Ander, P. 1990. «Microbial and enzymatic degradation of wood and wood components». Springer-Verlag, Berlin, 407 pp.

Flaig, W. 1972. «Contribution of soil organic matter in the system soil-plant». In: Krumbein, W.E. (ed.) *Environmental Biogeochemistry*, vol. 2. Ann Arbor Science Pub., USA.

Fogel, R. and G. Hunt 1983.. «Contribution of mycorrhizae and soil fungi to nutrient cycling in a Douglas-fir ecosystem *Can. Journ. For. Res.* **13**:219-232.

Garcia, S., Latge, J.P., Prévost, M.C. and Leisola, M.S.A. 1987. «Wood degradation by white-rot fungi: cytochemical studies using lignin peroxidase-immunoglobulin-gold-complex». *Appl. Environ. Microbiol.* **53**: 2384-2387.

Glenn, J.K. and Gold, M.H. 1985. «Purification and characterization of an extracellular Mn (II)-dependent peroxidase from the lignin-degrading by the Basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium*». *Arch. Biochem. Biophys.* **242**:329-341.

Gosz, J. R. and Fisher, F. M. 1984. «Influence of clear-cutting on selected microbial processes in forest soils» in *Current Perspectives in Microbial Ecology*. Proceedings of the Third International Symposium on Microbial Ecology (Klug, M.J. & Reddy, C.A., eds.), pp. 523-530.

Gosz, J. R., Holmes, R.T., Likens, G. E. et Bormann, F.H. 1978. «Le flux d'énergie dans un écosystème forestier». In *Pour la Science*, juin 1987, pp. 101-110.

Guay, E., Lachance, L. et Lapointe, R.A. 1982. «Emploi des bois raméaux fragmentés et des lisiers en agriculture». Rapports techniques 1 et 2, Ministère des Terres et Forêts du Québec, Québec. 74 pages.

Hintikka, V. 1982. «The colonization of litter and wood by basidiomycetes in Finnish forest». In: Frankland, J.C., Hedger, J.N. & Swift, M.J. (eds.) *Decomposer basidiomycetes, their biology and ecology*. Cambridge University Press, Cambridge. Pp. 227-239.

Hogberg, P. and Pearce, G.D. 1986. «Mycorrhizas in Zambian trees in relation to host taxonomy, vegetation type and successional patterns». *J. Ecol.* **74**:775-785.

Ingham, R. E., Trofymow, J. A., Ingham, E. R. and Coleman, D.C. 1985. «Interactions of bacteria, fungi, and their nematode grazers; effects on nutrient cycling and plant growth». *Ecol. Monogr.* **55**:119-140.

Janos, D. P. 1980. «Mycorrhizae influence tropical succession». *Biotropica* **12 (Suppl.)**: 56-64.

Janos, D. P. 1980. «Mycorrhiza applications in tropical forestry: are temperate-zones-approaches appropriate?» Pages 133-188 in S. P. Ng (ed.) *Trees and Mycorrhiza*. Forest Research Institute, Kuala Lumpur, Malaysia.

Jones, A. and O'Carroll, L. 1989.. «Biotechnological modification of lignin». Alberta Research Council, Technical Report. Edmonton, Canada. 18 pages (mimeographed).

Kirk, T.K. and Farrell, R.L. 1987. «Enzymatic combustion: The microbial degradation of lignin». *Ann. Rev. Microbiol.* **41**:465-505.

Kirk, T.K. and Fenn, P. 1982. «Formation and action of ligninolytic system in Basidiomycetes». In: *Decomposer Basidiomycetes: their Biology and Ecology* (Franklin, J.C., Hegger, J.N. & Swift,

M.J., eds.). Cambridge Univ. Press. Pp. 67-90.

Kristeva, L. A. 1953. «The participation of humic acids and other organic substances in the nutrition of higher plants». *Pochvivedenie* **10**:464-469.

Larochelle, L. 1993. «L'influence de la qualité des bois raméaux fragmentés (BRF) appliqués au sol: effect sur la dynamique de leur transformation». In Les actes du quatrième colloque international sur les bois raméaux fragmentés, édité par le Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux, Département des Sciences Forestières, Université Laval, Québec (Canada). 187 pages. ISBN 2-550-28792-4 FQ 94-3014. Pp. 77-84.

Larochelle, L., Pagé, F., Beauchamp, C. et Lemieux, G. 1993. «La mésofaune comme indicateur de la dynamique de la transformation de la matière ligneuse appliquée au sol». *AGROSOL* **6(2)**:36-43.

Leatham, G.F. and Kirk, T.K. 1982. «Regulation of lignolytic activity by nutrient nitrogen in white-rot basidiomycetes». *FEMS Microbiol. Lett.* **16**: 65-67.

Leisola, M. and Waldner, R. 1988. «Production, characterization and mechanism of lignin peroxidases». In: Zadrazil, F., Reiniger, P. (eds.) *Treatment of lignocellulosics with white rot fungi*. Elsevier Appl. Sci. Pub., New York. Pp. 37-42.

Leisola, M.S.A. and Garcia, S. 1989.. «The mechanism of lignin degradation». In *Enzyme systems for lignocellulose degradation*. Workshop held at Galway, Ireland within the framework of the European Economic Community. Published by Elsevier Applied Science, pp. 89-99.

Leisola, M.S.A. et Garcia, S. 1989. «Le mécanisme de dégradation de la lignine». Traduction française du texte anglais original publié dans *Enzyme Systems for Lignocellulose Degradation*, Galway, Ireland, pp. 88-89. Publié dans «Le bois raméal et la pédogénèse: une influence agricole et forestière directe». Université Laval, Québec. ISBN 2-550-21267-3. Publication n ER90-3128.

Lemieux, G., Lachance, L. et Lapointe, A. 1989. «L'intersuffisance des écosystèmes épigé et hypogé». Texte original, traduction française et commentaires de Perry, D.A., Amaranthus, M.P., Borchers, J.G., Borchers, S.L. et Brainerd, R.E. «Bootstrapping in Ecosystems». *BioScience* **39(4)**:230-237 (1989). Université Laval, Département des Sciences Forestières. 41 pages. ISBN 2-550-21445-5. Publication n ER90-3140.

Lemieux, G., Marcano, J. et Gonzalez, A. 1994. «Rapport de mission en République Dominicaine du 26 avril au 8 mai 1994». Université Laval, 56 pages français/espagnol.

Lemieux, G. & Goulet, M. 1992. «Sylvagraire» und «Sylvasol», neue Wege zum Aufgradieren von Acker- und Waldböden», Düsseldorf. Université Laval. ISBN 2-550-26540-8 FQ 92-3102. 4 pages.

Lemieux, G. et Lachance, L. 1995. «Essais d'utilisation du bois raméal fragmenté (BRF) pour la régénération des sols dans les cultures en couloir en milieu africain». Université Laval, Département des Sciences du Bois et de la Forêt, 16 pages. ISBN 2-921728-14-1.

Lemieux, G. et Lapointe, R.A. 1985. «Essais d'induction de la végétation forestière vasculaire par le bois raméal fragmenté». Département des Sciences Forestières, Université Laval, Québec, 109 pages. ISBN 2-550-21340-8. Publication n 3226.

Lemieux, G. et Lapointe, R.A. 1986. «Le bois raméal et les mécanismes de fertilité du sol». Département des Sciences Forestières, Université Laval, Québec. 17 pages. ISBN 2-550-21338-1. Publication n ER89-1211.

Lemieux, G. et Lapointe, R.A. 1988. «L'importance du bois raméal dans la "synthèse" de l'humus». Département des Sciences Forestières, Université Laval, Québec, 29 pages. ISBN 2-550-21341-6. Publication n ER89-1250.

Lemieux, G. et Lapointe, R.A. 1989. «La régénération forestière et les bois raméaux fragmentés: observations et hypothèses». Département des Sciences Forestières de l'Université Laval, Québec,

223 pages. ISBN 2-550-21342-4. Publication n ER89-1276.

Lemieux, G. et Lapointe, R.A. 1990. «Le bois raméal et la pédogénèse: une influence agricole et forestière directe». Département des Sciences Forestières, Université Laval et Ministère de l'Énergie et des Ressources (Forêts), Québec. 35 pages. ISBN 2-550-21267-3. Publication n ER90-3136.

Lemieux, G. et Tétreault, J.-P. 1993. «L'origine forestière des sols agricoles: la diversification microbiologique par aggradation sous l'effet des bois raméaux fragmentés». Présenté en conférence à Bruxelles. Octobre 1992. Université Laval, 31 pages y compris les discussions. ISBN 2-550-27481-4. Publication n FQ93-3052.

Lemieux, G. et Tétreault, J.-P. 1993. «Les actes du quatrième colloque international sur les bois raméaux fragmentés». Édité par le Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux, Université Laval, Québec, Canada, 187 pages. ISBN 2-550-28792-4, FQ94-3014.

Lemieux, G. et Tétreault, J.-P. 1994. «Le bois raméal, le système humique et la sécurité alimentaire». Université Laval, Québec, 16 pages. ISBN 2-921728-10-9.

Lemieux, G. et Toutain, F. 1992. «Quelques observations et hypothèses sur la diversification: l'aggradation des sols par l'apport de bois raméal fragmenté». Université Laval, 13 pages. ISBN 2-550-26541-6, FQ92-3103.

Lemieux, G. 1992. «L'aggradation des sols par le patrimoine microbiologique d'origine forestière». Escola Superior Agraria de Coimbra, Portugal. Université Laval. ISBN 2-550-26521-1. Publication n FQ92-3099. 10 pages.

Lemieux, G. 1993. «A universal pedogenesis upgrading process: RCW to enhance biodiversity and productivity». Food and Agriculture Organization (FAO), Rome. ISBN 2-921728-05-2. 6 pages (translation from French).

Lemieux, G. 1993. «L'aggradation pédogénétique, un processus universel sous l'influence des BRF: les effets sur la biodiversité et la productivité». FAO, Rome, décembre 1993. Université Laval, Département des Sciences Forestières. 6 pages.

Lemieux, G. 1993. «Le bois raméal fragmenté et la méthode expérimentale: une voie vers un institut international de pédogénèse» in *Les Actes du Quatrième Colloque International sur les Bois Raméaux Fragmentés*, p. 124-138. G. Lemieux et J.P. Tétreault, éditeurs, Université Laval, Québec, Canada. ISBN 2-550-28792-4 FQ94-3014.

Lemieux, G. 1994. «La lignine des Dicotylédones ligneuses: son influence universelle sur le système humique». Séminaire donné à l'Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña, Santo Domingo, République Dominicaine. Université Laval, Québec, 56 pages. ISBN 2-921728-11-7, 1995.

Lemieux, G. 1995. «La dynamique de l'humus et la méthode expérimentale: l'apport de la forêt à l'agriculture par le bois raméal fragmenté». Texte présenté à la Conférence Constitutive du Réseau Africain du Compost, Dakar, 26 avril. Université Laval, Québec, 13 pages. ISBN 2-921728-12-5.

Lemieux, G. 1995. «Passer de l'enthalpie à l'entropie». Écodécision, hiver 1995, pp. 72-73. Royal Society of Canada. Université Laval, Québec.

Lemieux, G. 1995. «Rapport de mission en Afrique (Sénégal)». ACDI et Université Laval, décembre 1994, 48 pages. ISBN 2-921728-08-7.

Lemieux, G. 1995. «Les germes économiques et scientifiques de la révolution verte au Sahel». Université Laval, Québec. 23 pages. ISBN 2-921728-13-3.

Levy, J.F. 1979. «The place of Basidiomycetes in the decay of wood in contact with the ground». In Frankland, J.C., J.N. Hedger & M.J. Swift (eds.) "*Decomposer Basidiomycetes: Their Biology and ecology*". 346 pp. Cambridge University Press. Cambridge.

- Lewis, N.G., Razal, R.A. and Yamamoto, E.** 1987. «Lignin degradation by peroxidase in organic media: a reassessment». *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 7925-7927.
- Lynch, J.M. & Bragg, E.** 1985. «Microorganisms and soil aggregate stability». *Adv. Soil Sc.* **2**: 133-171.
- Malloch, D.W., Pirozynsky, K.A. and Raven, P.H.** 1980. «Ecological and evolutionary significance of mycorrhizal symbioses in vascular plants». *Proc. Natl. Acad. Sci.* **77**: 2112-2218.
- Martin, W.C., Pierce, R. S., Likens, G. E. and Bormann, F.H.** 1986. «Clearcutting Affects Stream Chemistry in the White Mountains of New Hampshire». USDA Northeastern Forest Experiment Station Research Paper EN-579.
- Meyer, F.H.** 1985. «Einfluss des Stickstofffaktors auf den Myckorrhzabebatz von Fichtensaemligen im Humus einer Waldschadensflaeche». *Alleg. Forst- zeitschrift* 9/10.
- Meyer, J. R. and Linderman, R.G.** 1986. «Selective influence on population of rhizosphere or rhizoplane bacteria and actynomycetes by mycorrhizas formed by *Glomus fasciculatum*». *Soil Biol. Biochem.* **18**: 191-196.
- Olsen, R.A., Clark, R.B. and Bennet, J.H.** 1981. «The enhancement of soil fertility by plant roots». *Am. Sci.* **69**: 378-384.
- Pagé, F.** 1993. «L'apport des bois raméaux en sols cultivés: le rôle de la pédofaune sur la transformation de la matière ligneuse». In *Les actes du quatrième colloque international sur les bois raméaux fragmentés*, édité par le Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux, Département des Sciences Forestières, Université Laval, Québec, Canada. 187 pages. ISBN 2-550-28792-4 FQ94-3014, p. 68-76.
- Parkinson, D.** 1988. «Linkage between resource availability, microorganisms and soil invertebrates». *Agriculture, Ecosystems and Environment* **24**: 21-32.
- Perry, D. A., Amaranthus, M.P., Borchers, J.G., Borchers, S. L. and Brainerd, R. E.** 1989. «Bootstrapping in Ecosystems». *BioScience* **39(4)**: 230-237.
- Prigogine, I. and Stengers, I.** 1978. «Order out of chaos Bantam edit., Toronto, Canada.
- Rambelli, A.** 1973. «The rhizosphere of mycorrhizae». Pages 229-249 in A. C. Marks and T.T. Kozlowski, Eds. *Ectomycorrhizae: Their Ecology and Physiology*. Academic Press, London.
- Ratnayake, M., Leonard, R.T. and Menge, J. A.** 1978. «Root exudation in relation to supply of phosphorus and its possible relevance to mycorrhizal formation». *New Phytol.* **81**: 543-552.
- Rayner, A.D.M. and Boddy, Lynne.** 1988. «Fungal Decomposition of Wood». John Wiley & Sons. 597 pp.
- Rayner, A.D.M. and Coates, D.** 1987. «Regulation of mycelial organization and responses» in *Evolutionary Biology of the Fungi* (Rayner, A.D.M., Brasier, C.M. & Moore, D., eds.). Cambridge University Press, Cambridge.
- Reid, C.P.P. and Mexal, J.G.** 1977. «Water stress effects on root exudation by lodgepole pine». *Soil Biol. Biochem.* **9**: 417-422.
- Rouquerol, T., Bauzon, D. and Dommergues, Y.** 1975. «Les ectomycorhizes et la nutrition azotée et phosphatée des arbres». Congrès DGRST, mai 1975.
- St. John, T. V. and Coleman, D.C.** 1982. «The role of mycorrhizae in plant ecology». *Can. Journ. Bot.* **61**: 1005-1014.
- Sauvesty, A., Pagé, F. and Giroux, M.** 1993. «Impact des milieux pédologiques en bosses et creux sur les teneurs en composés phénoliques et en éléments minéraux dans les feuilles d'érable à sucre en dépérissement au Québec». *Can. Jour. For. Res.* **23**: 190-198.

- Seck, M.A.** 1993. «Essais de fertilisation organique avec les bois raméaux fragmentés de filao (*Casuarina equisetifolia*) dans les cuvettes maraîchères des Niayes (Sénégal)». In *Les Actes du Quatrième Colloque International sur les Bois Raméaux Fragmentés*, p. 36-41. G. Lemieux et J.P. Tétrault, éditeurs. Université Laval, Québec, Canada. ISBN 2-550-28792-4 FQ 94-3014.
- Stott, D. E., Kassim, G, Jarrel, M. I., Martin, J.P. and Haider, K.** 1993. «Stabilization and incorporation into biomass of specific plant carbons during biodegradation in soil». *Plant and Soil* **70**: 15-26.
- Swift, M.J.** 1976. «Species diversity and structure of microbial communities». In J.M. Anderson and A. MacFaden (Eds.) *Decomposition processes*. Blackwell Scientific Publications, Oxford. P. 185-222.
- Swift, M.J.** 1977. «The role of fungi and animals in the immobilisation and release of nutrient elements from decomposing branch-wood». In *Soil organisms as Components of Ecosystems* (Lohm, U. & Persson, T., eds.), p. 193-203. *Ecol. Bull.* **25**. Swedish Natural Science Research Council, Stockholm.
- Swift, M.J., Heal, O.W. and Anderson, J.M.** 1979. «The influence of resource quality on processes». In *Studies in Ecology*, vol. 5 "*Decomposition in Terrestrial Ecosystems*". Univ. of California Press, Berkeley, p. 118-167.
- Tate, R.L.** 1987.. «Soil organic matter: biological and ecological effects». Wiley-Interscience Pub. New York, USA. 291 p.
- Thomas-Bauzon, D., Weinhard, P., Villecourt, P. and Balandreau, J.** 1982. «The spermosphere model. I. Its use in growing, counting and isolating N₂-fixing bacteria from the rhizosphere of rice». *Can. Journ. Microbiol.* **28**: 922-928.
- Thomas-Bauzon, D., Kiffer, E., Pizelle, G. and Petitdemange, E.** 1990. «Fixation d'azote et cellulolyse: activités de la nitrogénase et/ou de la cellulase d'organismes fixateurs d'azote et/ou cellulolytiques». Presses de l'Université de Nancy, 89 pages.
- Thomas-Bauzon, D., Kiffer, E., Janin, G. and Toutain, F.** 1995. «Méthodologie de recherche des bactéries cellulolytiques diastrophes appliquée à *Sphaerothermes sphaerotorax*». *Science de la Vie/Life Science* **318**: 699-707.
- Thompson, W.** 1984. «Distribution, development and functioning of mycelial cord systems of decomposer basidiomycetes of the deciduous woodland floor». In *The Ecology and Physiology of the Fungal Mycelium* (Jennings, D. H. & Rayner, A.D.M., eds.), p. 185-214. Cambridge University Press, Cambridge.
- Tien, M. and Kirk, T.K.** 1983. «Lignin-degrading enzyme from Hymenomycete *Phanerochaete chrysosporium* Burds». *Science* **221**: 661-663.
- Toutain, F.** 1993. «Biodégradation et humification des résidus végétaux dans le sol: évolution des bois raméaux (étude préliminaire)». In "*Les actes du quatrième colloque international sur les bois raméaux fragmentés*", édité par le Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux, Département des Sciences Forestières, Université Laval, Québec (Canada). ISBN 2-550-28792-4 FQ94-3014, p. 103-110.
- Trappe, J.M.** 1962. «Fungus associates of ectotrophic mycorrhizae». *Bot. Rev.* **28**: 538-602.
- Tremblay, Y.** 1985. «Essais comparatifs de l'utilisation de la biomasse forestière et du lisier de porc dans la culture des pommes de terre par le compostage de surface (sheet composting) avec apports variables d'engrais de synthèse». Ministère de l'Agriculture, Québec, rapport interne, 8 p.
- Vaughan, D. and Ord, B.G.** 1985. «Soil organic matter: a perspective on its nature, extraction, turnover and role in soil fertility». In (Vaughan, D. & Malcolm, R. E., Eds.) "*Soil Organic Matter and Biological Activity*", pp. 469. Martinus Nijhoff & W. de Junk Pub., Dordrecht, Holland.

Vicuna, R. 1988. «Bacterial degradation of lignin». *Enzyme Microb. Technol.* **10**: 646-655.

Vogt, K.A., Grier, C.C. and Meier, C. E. 1982. «Mycorrhizal role in net primary products and nutrient cycling in *Abies amabilis* ecosystems in western Washington» *Ecology* **63**: 370-380.

Whipps, J.M. and Lynch, J.M. 1986. «The influence of the rhizosphere on crop productivity». *Adv. Microb. Ecol.* **9**: 187-244.

¹ *Madera Rameal* (Nota del Traductor)

² *Madera Rameal Fragmentada* (o *Astillas Verdes*, en la República Dominicana) (Nota del Traductor)

³ Una definición arbitraria de éstas, dependiendo del uso local. Generalmente, mientras menor es el diámetro, mayor es el contenido de lignina, proteínas y nutrientes.

⁴ Un término genérico que abarca a todos los azúcares (glucosa, sacarosa, fructosa, manosa, etc.).

⁵ Durante experimentos subsiguientes en Senegal, donde el pH supera 8.0, encontramos una caída notable en el pH hacia la neutralidad. La explicación podría encontrarse en el comportamiento de los sistemas enzimáticos.

⁶ Experimentos realizados con maíz en Costa de Marfil 2 años después mostraron aumentos en la materia seca de 400%.

⁷ Este resultado es más notable en los países tropicales.

⁸ Se observó una reducción significativa en *Sclerotinia sclerotinum* sobre los tubérculos de papa, lo mismo que una reducción de áfidos en fresas. En áreas tropicales, los nemátodos de raíz (*Melodogyne javanica*, *M. mayagenis* y *Scutellonema cavenessi*) desaparecieron completamente.

⁹ Un costo estimado preliminar en 1985 sugería Cdn\$1,000 por hectárea, distribuidos en cinco años.

¹⁰ Neologismo para el fraccionamiento de moléculas complejas para producir nuevas que son, por lo menos, tan complejas, usando nuevos sistemas enzimáticos que resultan de cambios en los niveles de vida causados por un aumento en la biodiversidad y la disponibilidad de energía.

¹¹ Ramial Chipped Wood (RCW) en inglés, Bois Raméal Fragmenté (BRF) en francés, Aparas de Ramos Fragmentados (ARF) en portugués, Madera Rameal Fragmentada (MRF) en español, y Fragmentiertes Zweigholz (FZH) en alemán.

¹² Esta regulación se logra mejor a través de sistemas enzimáticos, pero también puede ser hecha a través de desplazamientos químicos. Tales sistemas pueden ser alógenos (inducidos por la MRF) o endógenos (originados de la acción microbiológica).

¹³ Esta es una macromolécula, sobre la cual la literatura no ofrece pistas en cuanto a su estructura. Lo mismo también es cierto para el humus, los humatos y la humina. Ellos parecen ser remanentes altamente variados de la lignina luego de varios ataques químicos y biológicos, con un alto peso molecular y una débil tendencia ácida. Con frecuencia, en la literatura, se confunden humus y "materia orgánica".

¹⁴ El género *Pinus* es el más importante.