

EL VÍNCULO DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA CON LA VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN SUBSUPERFICIAL DEL SUELO DEL BOSQUE

THE LINK BETWEEN SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY AND SUBSURFACE INFILTRATION RATES OF FOREST SOILS

Marino S. Morikawa-Sakura^a; Komatsu Yoshitaka^b

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue investigar el vínculo de la conductividad hidráulica saturada con las tasas de infiltración. Se determinó un total de 38 puntos de muestreo; 22 en cedro japonés (*Cryptomeria japonica*) y 16 en *hiba arborvitae* (*Thujaopsis dolabrata*). Para obtener una precipitación se utilizó un simulador de lluvia de boquilla oscilante. Se tomaron de la superficie algunas muestras de vegetación. Se recogieron muestras de suelo de tres réplicas de profundidad de 0-5 y 5-10 cm cada uno por las características del suelo. La permeabilidad del suelo y la conductividad hidráulica se midieron antes y después del aclareo de cada muestra de tierra. La conductividad hidráulica es espacialmente irregular y los parámetros son independientes del tipo de vegetación. Ambos suelos forestales en general mostraron valores de permeabilidad alta, pero se ha demostrado también un valor tan pequeño como el acuicludo en un solo punto de la muestra de la superficie del cedro. Esto podría ser debido a la poca capa de hojarasca acumulada en el punto. Si el recubrimiento es escaso en el suelo del bosque, la reducción de la tasa de infiltración sería una preocupación debido a la obstrucción de la superficie por el impacto de las gotas de lluvia. Por otro lado, en términos de la profundidad de la baja permeabilidad, la superficie del suelo es menos afectada debido a las propiedades físicas del suelo y la cantidad de raíz. Para entender los factores de la infiltración y la cercanía del suelo con la superficie, otros parámetros, en especial la conductividad hidráulica saturada, cantidad de raíces en el suelo superficial, la densidad de la cobertura del suelo seco del bosque y contenido de la materia orgánica (peso de la pérdida por ignición durante 4 horas a 450 °C) fueron examinados, comparados y analizados para confirmar su relación. Los resultados revelaron que las características de la cubierta del suelo de los bosques y la permeabilidad se encontraron pobremente correlacionadas. Además, el resultado demostró que la tasa de infiltración y la permeabilidad difieren de acuerdo a las diferencias de las especies de árboles.

Palabras clave: simulador de lluvia de boquilla oscilante, tasa de infiltración, cedro japonés, *hiba arborvitae*.

a Universidad de Tsukuba, Japón.

b Universidad de Tsukuba, Japón.

ABSTRACT

This study aims to research the link between saturated hydraulic conductivity and infiltration rates. A total of 38 sampling points were determined, out of which 22 were from Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) and 16 from *Hiba arborvitae* (*Thujaopsis dolabrata*). An oscillating nozzle-type rainfall simulator was used to simulate precipitation. Samples of vegetation were taken from the surface. Soil samples from three layers of depth between 0-5 and 5-10 cm each were collected for soil characteristics. Soil permeability and hydraulic conductivity were measured before and after thinning of each soil sample. Hydraulic conductivity is spatially irregular, and parameters are independent of the type of vegetation. Both forest soils show, in general, high permeability values, but a value as small as aquiclude in one point of the surface of the cedar sample, has been demonstrated. This could be attributed to a lack of litter accumulated at the location. If coating were scarce in the forest floor, reducing the infiltration rate would become a concern due to the surface's blockage by the impact from raindrops. Furthermore, in terms of the depth of the low permeability soil's surface, it is less affected due to the physical properties of the soil and the availability of roots. In order to understand the factors affecting infiltration and the proximity of the soil to the surface, other parameters, especially the saturated hydraulic conductivity, number of roots in the surface soil, the coverage density of the dry forest floor, and organic matter content (weight loss on ignition for 4 hours at 450 ° C) were examined, compared and analyzed to confirm their correlation. Results revealed that the characteristics of the soil cover of forests and permeability were poorly correlated. Finally, the result showed that the rate of infiltration and permeability differ according to differences in tree species.

Keywords: oscillating nozzle rainfall simulator, Infiltration rate, japanese cedar, *Hiba arborvitae*.

I. INTRODUCCIÓN

Para la conservación del agua y el suelo en los ecosistemas forestales, las cubiertas de suelo del bosque proporcionadas por la vegetación y desperdicios materiales del sotobosque son vitales. La cobertura del suelo puede reducir el impacto directo de la lluvia a la superficie del suelo y mejorar la velocidad de infiltración, la conductividad hidráulica saturada y las características de la cubierta baja del subsuelo. Su ventaja respecto a esto ha sido profunda y ampliamente discutida por numerosos investigadores^{1,2,3,4,5}. Sin embargo, en Japón, debido a la falta de un manejo adecuado de los bosques y plantaciones, la cubierta de los suelos se dificulta en su forma, disminuye drásticamente la tasa de infiltración y la escorrentía a menudo se produjo poco después de la lluvia^{6,7,8}.

La relación lineal entre la cubierta de la superficie y la tasa de infiltración final mostró que la cubierta de la superficie aumenta en gran medida la capacidad de infiltración del suelo. Estudios previos que se basan en enfoques infiltrómetros claramente descubrieron una fuerte correlación positiva entre la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica saturada^{3,9}. La infiltración se ve fuertemente afectada por el control de la conductividad hidráulica y la curva característica de humedad del suelo¹⁰. Sin embargo, poco se sabe sobre la relación entre la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica y la respuesta a las prácticas de manejo en las plantaciones del ciprés japonés.

El objetivo de este estudio es investigar la relación entre la tasa de infiltración y la conductividad hidráulica saturada,

antes y después del aclareo de la operación. También se investigan los diferentes parámetros que pueden influir en la infiltración y conductividad hidráulica.

II. PUNTO DE ESTUDIO

El presente estudio se encuentra en la prefectura de Ishikawa, centro de Japón (Figura 1). De acuerdo con la estación meteorológica de Kanazawa, ubicada en la prefectura central de Ishikawa (36°35,3' N, 136°38,0' E), la temperatura media y la precipitación media anual de 1886 a 2010 fueron 15,0 °C y 2279 mm, respectivamente. Los suelos están dominados por los suelos forestales pardos, según el sistema de clasificación de suelo japonés¹¹.

Los lugares de estudio se establecieron en dos masas forestales, cedro japonés e *hiba arborvitae*. Las agujas de las hojas del cedro japonés están organizadas a lo largo de la rama, que apunta de un lado hacia arriba. La hoja de la *hiba arborvitae* es la más grande dentro de las hojas escamosas de la familia *Cupressaceae*; difieren

entre 4 a 6 mm de espesor (Figura 2). Por lo tanto la hojarasca de la *hiba arborvitae* podría proteger el suelo del bosque después de la deposición. En la Tabla 1 aparece la descripción en la parcelas de estudio. 38 parcelas fueron establecidas en cada stand y las parcelas del cedro japonés fueron etiquetados como C1-C22, y las parcelas de la *hiba arborvitae* como H1-H16 (Tabla 1).

III. METODOLOGÍA

3.1. Simulador de lluvia experimental

La boquilla oscilante del simulador de lluvia se utilizó para medir la tasa de infiltración¹². Cada pequeña parcela es utilizada para los experimentos de simulación de lluvia aproximadamente con un área horizontal proyectada de 1 m². Sus límites de ladera fueron afilados por 25 cm de alto de la pared ondulada, que fueron empujados 5 cm dentro de la capa superior del suelo para reducir al mínimo la perturbación del suelo superficial. En la parte inferior de la parcela se instaló una bandeja a lo largo de la dirección de la pendiente para medir manualmente la escorrentía a cada minuto, utilizando una botella de medición (Figura 3). El experimento duró más de 20 minutos con el fin de conseguir una velocidad de escurrimiento en estado estacionario.

3.2. Cálculo de la tasa máxima de infiltración final

La tasa de infiltración se calcula restando la tasa de escorrentía de la intensidad de lluvia. La tasa de infiltración final se calcula promediando los últimos cinco minutos de la prueba. Debido a que la

FIGURA 1
Ubicación del punto de estudio



TABLA 1
Descripción de las parcelas de estudio

Parcela ID	Tiempo transcurrido después del aclareo	Densidad de soporte (stem ha ⁻¹)	Proporción de la cubierta del suelo (%)	Vegetación del sotobosque (g m ⁻²)	Desperdicios materiales (g m ⁻²)
C1	1	1100	100	69	219,8
C2	0	1000	75	33,9	489,9
C3	5<	600	80	72,1	499,8
C4	2	500	60	193,2	1168,8
C5	3	1100	70	268,9	1269,8
C6	1	900	100	202,2	579,5
C7	0	1800	30	66,9	317,1
C8	5<	800	100	291,7	1195,4
C9	0	1600	70	187,8	1712,9
C10	1	500	90	19,4	629
C11	1	700	90	370,1	537,4
C12	0	900	40	7,7	456,7
C13	5<	700	70	181,6	1163,7
C14	1	900	90	2,5	254,7
C15	0	1300	45	293,6	677,2
C16	3	900	50	112,7	1779
C17	2	400	80	75	1669,9
C18	1	1200	85	3,6	359
C19	0	1500	90	0,5	880,4
C20	1	600	95	45,8	422,1
C21	0	2000	95	0	1152
C22	1	1000	70	163,5	945,4
H1	3	1300	55	60,8	580,6
H2	0	700	95	7,2	1024,6
H3	2	900	90	0	466,4
H4	1	400	90	7	864,2
H5	1	1300	70	2,3	572,5
H6	5<	1000	98	50,9	929,6
H7	0	2100	99	896	797,5
H8	1	500	90	0	419,8
H9	0	2100	85	73,4	1573,5
H10	5<	400	95	66,4	1236,7
H11	3	800	80	39	452,2
H12	0	2000	70	400,4	1914
H13	1	400	85	0	1204,1
H14	0	2700	80	305,1	469,6
H15	1	500	90	0	1177,5
H16	2	500	80	5,1	581,4

FIGURA 2
Estado de los desperdicios. (a) Cedro japonés y (b) *Hiba arborvitae*

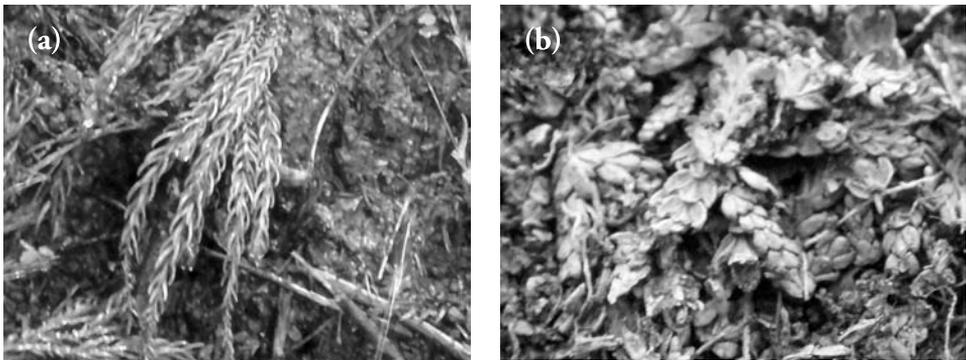


FIGURA 3
(a) Boquilla oscilante del simulador de lluvia y (b) parcela experimental



tasa de infiltración puede depender de la intensidad de lluvia^{9,10,13,14}, la tasa de infiltración fue estandarizada, basada en la siguiente ecuación¹⁵.

$$f(i) = FIR_{max} \cdot \tanh(i / FIR_{max}) \quad (1)$$

donde f es la tasa de infiltración final bajo la lluvia con una intensidad de i ; i es la intensidad de la lluvia aplicada; y FIR_{max} es la tasa máxima de infiltración bajo la intensidad de lluvia infinita.

3.3. Las mediciones de la conductividad hidráulica

Tres repeticiones de una profundidad de 0-5 y 5-10 cm cada una, con un total de 6 muestras de cada parcela, se

utilizaron para determinar la conductividad hidráulica saturada, la densidad de carga seca a granel, el contenido inicial de humedad gravimétrica y volumétrica (después del secado al horno durante 24 horas).

La conductividad hidráulica saturada se midió durante un periodo de 48 horas para permitir que la muestra de suelo llegue a un estado saturado. El método de ensayo se basa en un método de prueba de carga constante de baja permeabilidad, realizado por el cambio al método de carga descendente como se muestra en la ecuación (2) para la carga constante y la ecuación (3) para la carga descendente¹⁶.

$$k_o = \frac{Q}{A \cdot t} \cdot \frac{l}{h} \quad (1)$$

donde Q es la unidad del área de la descarga de drenaje (cm^3), A es el área de la sección transversal para la toma de muestras (cm^2), l es la longitud (cm), t es el tiempo (s), y h es la carga de agua (cm).

$$k_o = \frac{2.3al}{At} \log_{10} \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (2)$$

donde a es el área de la sección transversal de la tubería (cm^2), A es el área de la sección transversal para la toma de muestras (cm^2), l es la longitud (cm), t es el tiempo (s), y h es la carga de agua (cm).

3.4. Las mediciones de la cubierta superficial

Se examinaron otros parámetros, tales como la vegetación del sotobosque, material del lecho, cantidad de raíces en el suelo superficial, la densidad seca de la cobertura del suelo del bosque y el contenido de materia orgánica (peso de la pérdida por ignición durante 4 horas a 450°C)^{17,18}. Las distribuciones del tamaño de las partículas de tierra vegetal se analizaron usando el método del tamizado ($> 450 \mu\text{m}$) y el analizador del tamaño de partículas por difracción láser (SALD-3100; Shimadzu Co., Ltd., Kyoto, Japan).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. La tasa de infiltración máxima final en el cedro japonés y las plantaciones del *hiba arbovitae*

La tasa de infiltración máxima (FIR_{max}) varió desde 142 hasta 562 mm/h en la

plantación de cedro japonés y desde 93 hasta 641 mm/h en la plantación *hiba arbovitae* (Tabla 2) y estos resultados estuvieron en buena concordancia por estudios anteriores en los suelos de los bosques⁵. A pesar del alto valor de la tasa de infiltración en los dos tipos de bosques, se ha observado el escurrimiento superficial. Como se muestra en la Figura 4, FIR_{max} y el aclareo del año han mostrado una débil relación lineal. Esto podría ser causado por el aumento de la rugosidad superficial y la disminución de la permeabilidad como resultado de la formación de costras. Estudios previos han señalado claramente que el impacto de la gota de lluvia puede causar a la corteza una conducción a la fracción fina de la obstrucción de los poros de la superficie del suelo^{19,20}. También se ha indicado que la cantidad de escurrimiento superficial se relaciona linealmente con los contenidos de limo y arcilla⁵. Los resultados comparativos se han reportado en varios tipos de suelo²¹, como se muestra en la Figura 5, el FIR_{max} y el contenido de limo y la arcilla han demostrado débiles relaciones lineales.

4.2. La conductividad hidráulica en las plantaciones del cedro japonés y del *hiba arbovitae*

La conductividad hidráulica es espacialmente irregular y los parámetros son independientes del tipo de vegetación. De acuerdo con los resultados, las pruebas de permeabilidad en 5 cm del suelo superficial saturado estuvieron en el rango de 1 a 1651 mm/h en cedro japonés y de 458 a 2170 mm/h en *hiba arbovitae*.

El valor en la capa del suelo de 5 a 10 cm varió de 2 a 1,799 mm/h (cedro japonés) y 192 a 944 mm/h (*hiba arbovitae*). Ambos suelos forestales en general,

TABLA 2
Resultado de la densidad de masa, conductividad hidráulica, velocidad de infiltración y tasa de infiltración final máxima

Parcela ID	Densidad de masa (g cm ⁻³)		Conductividad hidráulica (mm hr ⁻¹)		Intensidad de lluvia (mm hr ⁻¹)	Tasa de infiltración (mm hr ⁻¹)	FIR _{max} (mm hr ⁻¹)
	0-5 (cm)	5-10 (cm)	0-5 (cm)	5-10 (cm)			
C1	0,51	0,69	1422	559	170,6	146,8	240,6
C2	0,72	0,78	1056	429	169,5	141,4	211,8
C3	0,47	0,58	1119	620	186,1	171,4	359,1
C4	0,6	0,75	1651	593	186,0	180,0	562,3
C5	0,66	0,95	426	202	179,4	151,8	209,2
C6	0,77	0,89	710	584	177,5	158,4	269,9
C7	0,8	0,79	808	565	190,2	127,9	141,9
C8	0,86	0,81	1169	1239	168,7	146,4	226,7
C9	0,8	0,83	703	697	177,8	170,9	316,9
C10	0,56	0,64	1015	1195	169,9	162,0	449,4
C11	0,81	0,79	839	1218	193,9	183,3	488,4
C12	0,85	0,95	1300	1799	182,9	172,8	324,3
C13	0,55	0,57	1111	1651	180,3	173,9	536,6
C14	0,44	0,58	1124	169	149,4	136,8	281,6
C15	0,83	0,9	335	330	153,2	114,3	146,4
C16	0,49	0,73	744	673	189,0	156,2	237,6
C17	0,85	1	101	155	176,9	166,0	389,0
C18	0,59	0,69	560	717	206,5	187,3	373,2
C19	0,77	0,81	1	2	191,6	169,4	301,2
C20	0,6	0,78	1366	330	179,1	172,7	537,7
C21	0,74	0,84	209	296	206,5	195,7	507,6
C22	0,38	0,49	684	505	188,3	141,7	175,1
H1	0,54	0,71	1344	581	229,7	164,4	203,6
H2	0,42	0,61	1361	858	184,5	110,6	93,3
H3	0,51	0,69	1136	674	193,5	153,5	214,0
H4	0,5	0,59	1628	782	177,4	165,1	371,9
H5	0,56	0,9	458	489	179,0	146,1	216,7
H6	0,53	0,81	613	192	176,4	150,9	242,4
H7	0,44	0,67	529	310	166,2	127,7	150,2
H8	0,5	0,73	1287	403	192,5	186,8	623,3
H9	0,4	0,45	945	944	193,1	171,2	277,8
H10	0,54	0,85	769	533	191,5	187,8	641,0
H11	0,51	0,58	1050	684	183,4	162,9	270,0
H12	0,67	0,84	1840	284	177,1	156,1	193,7
H13	0,37	0,45	2170	625	145,7	138,4	346,8
H14	0,72	0,91	1027	312	178,4	134,5	148,8
H15	0,55	0,74	1289	485	187,4	177,8	410,7
H16	0,42	0,53	741	818	176,7	150,9	225,2

mostraron valores de permeabilidad superiores, pero en el *hiba arborvitae* ha demostrado, además, un valor tan pequeño como el acuícudo en un solo punto de muestra de la superficie (Figura 6).

FIGURA 4
Diagrama de caja del FIR_{max} en lugares sin raleo y raleo.
(a) Cedro Japonés y (b) *Hiba arborvitae*

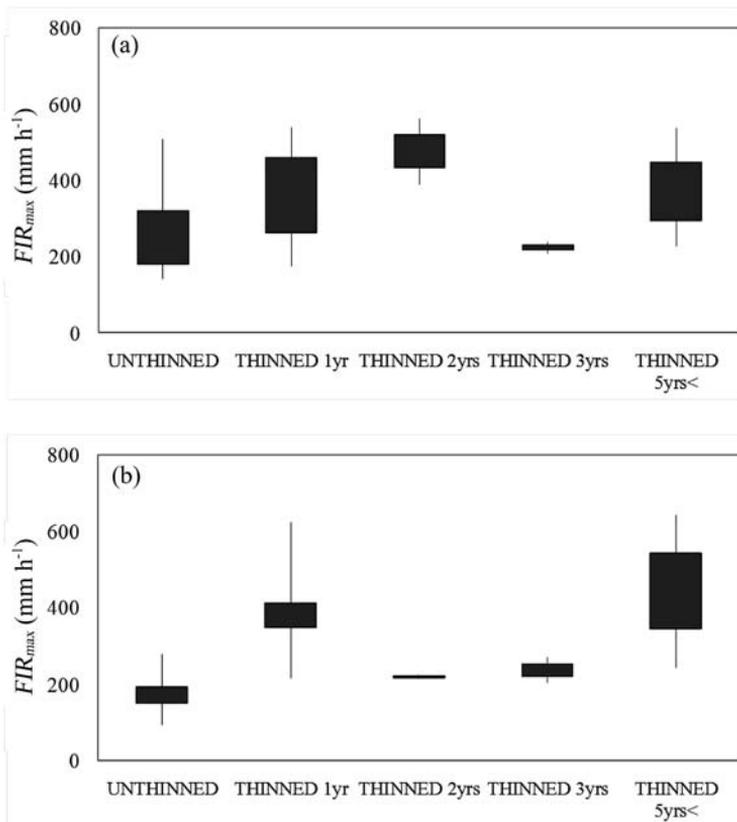


FIGURA 5
Las relaciones del FIR_{max} en contenido del limo y arcilla
entre (a) Cedro japonés y (b) *Hiba arborvitae*

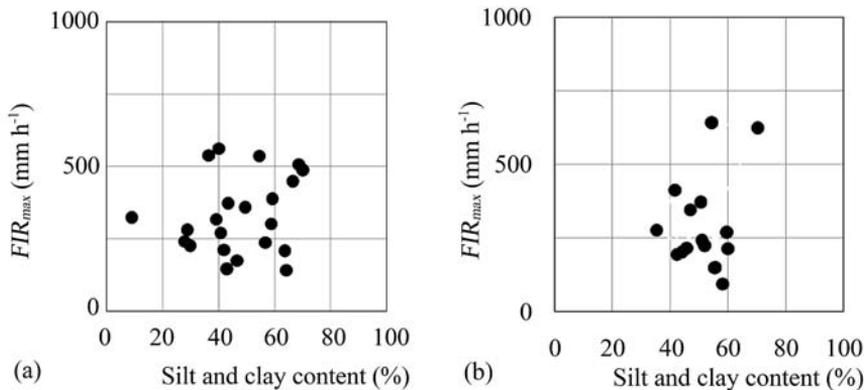
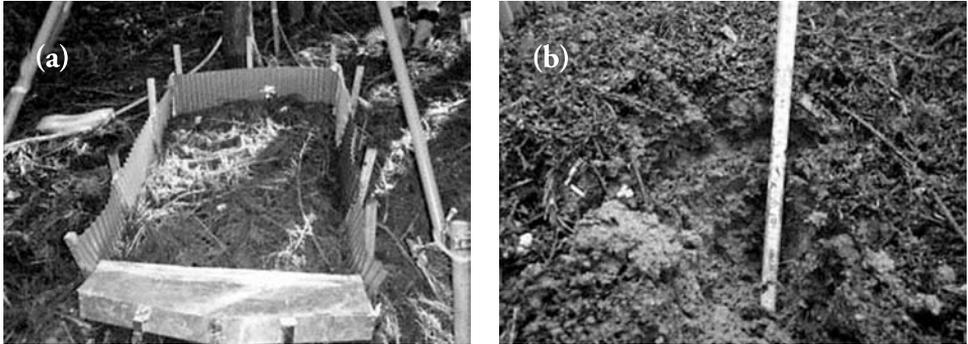


FIGURA 6
(a) Condiciones de la superficie de tierra y (b) Condiciones del suelo superficial



En la zona estudiada, la conductividad hidráulica disminuye gradualmente a medida de la profundidad del suelo, donde no se encontraron correlaciones significativas entre la conductividad hidráulica y el FIR_{max} (Cedro japonés: $r = 0,24$, $p = 0,27$, *hiba arborvitae*: $r = 0,10$, $p = 0,71$). Estudios previos reportan que la conductividad hidráulica disminuye gradualmente

cuando la profundidad del suelo es más profunda³, y se produce una correlación positiva significativa entre la conductividad hidráulica y la tasa de infiltración (Figuras 7, 8). La tendencia de la conductividad hidráulica fue armónica, sin embargo, la relación entre la tasa máxima de infiltración no coincidió con los resultados mostrados por algunos investigadores³.

FIGURA 7
Perfil de la conductividad hidráulica. (a) Cedro japonés (b) *Hiba arborvitae*

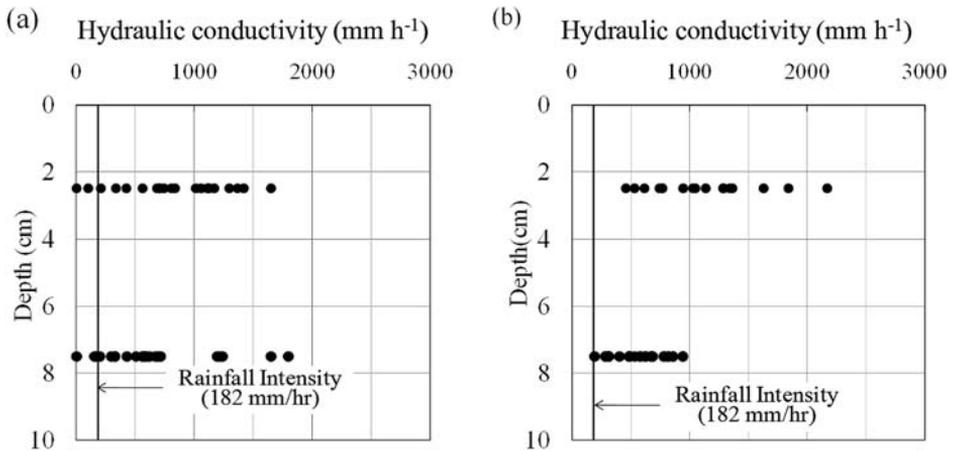
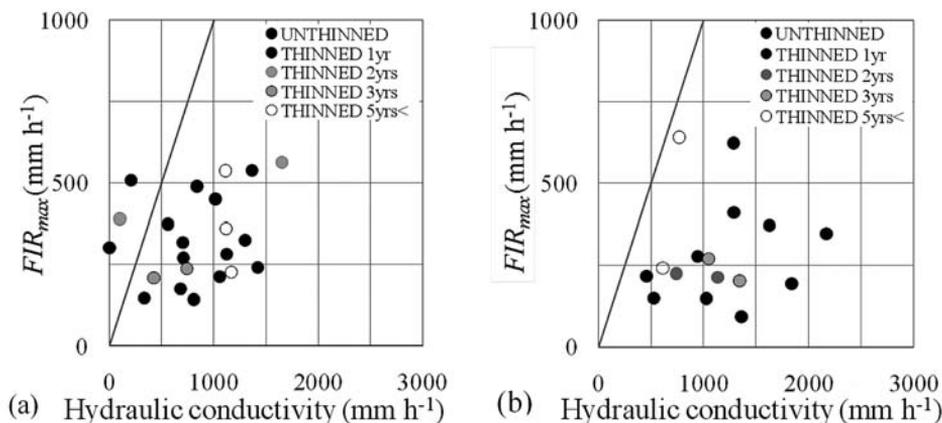


FIGURA 8
Las relaciones entre FIR_{max} y la conductividad hidráulica.
(a) Cedro japonés y (b) *Hiba arborvitae*



V. CONCLUSIONES

Nuestro resultado muestra una alta tasa de infiltración y conductividad hidráulica saturada en ambas áreas de estudio. Esto confirmó que el flujo de la superficie se ha producido en todos los puntos. Ambos suelos forestales en general mostraron valores de permeabilidad superiores; pero el cedro japonés ha demostrado, además, un valor tan pequeño como acucludo en un solo punto de muestra de la superficie. En estos sitios de estudio, la conductividad hidráulica disminuye gradualmente a medida de la profundidad del suelo, donde no se encontraron correlaciones significativas entre la conductividad hidráulica y la velocidad máxima de la infiltración. El valor de correlación se encuentra bajo, lo mismo que frente a los resultados de los

estudios similares previos. Esto podría ser debido a la diferencia de las especies y la variabilidad del sitio.

Gracias a este estudio podremos determinar los lugares donde se puede generar erosiones gravitacionales; y prevenir desastres naturales que puedan afectar en diversos lugares cercanos a los terrenos elevados que sobresalen de la superficie terrestre.

Agradecimientos

Estamos muy agradecidos con el personal de la Estación Experimental del bosque de Ishikawa, Prefectura de Ishikawa y a la Universidad de Tsukuba, Japón, por el apoyo en nuestros experimentos.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Kato H, Onda Y, Tanaka Y, Asano M. Field measurement of infiltration rate using an oscillating nozzle rainfall simulator in the cold, semiarid grassland of Mongolia, *Catena*, vol.76, 2009, pp. 173-181.
2. Loch RJ. Effects of vegetation cover on runoff and erosion under simulated rain and overland flow on a rehabilitated site on the Meandu Mine, Tarong, Queensland, *Aust. J. Soil Res.*, vol.38, 2000, pp. 299-312.
3. Zimmermann B, Elsenbeer H, De Moraes JM. The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation, *For. Ecol. Manag.*, vol.222, 2006, pp. 29-38.
4. Hiraoka M, Onda Y, Kato H, Mizugaki S, Gomi T, Nanko K. Effects of understory vegetation on infiltration capacity in Japanese cypress plantation, *J. Jpn. For. Soc.*, vol.92, 2010, pp. 145-150 (in japanese with english summary).
5. Miyata S, Onda Y, Gomi T, Mizugaki S, Asai H, Hirano T, Fukuyama T, Kosugi K, Sidle RC, Terajima T, Hiramatsu S. Factors affecting generation of Hortonian overland flow in forested hillslopes: analysis of observation results at three sites with different geology and rainfall characteristics, *J. Jpn. For. Soc.*, vol.91, 2009, pp. 398-407 (in japanese with english summary).
6. Tsujimura M, Onda Y, Harada D. The role of Horton overland flow in rainfall-runoff process in an unchanneled catchment covered by unmanaged Hinoki plantation, *J. Jpn. Soc. Hydrol. Water Resour.*, vol.19, 2006, pp. 17-24 (in japanese with english summary).
7. Gomi T, Sidle RC, Miyata S, Kosugi K, Onda Y. Dynamic runoff connectivity of overland flow on steep forested hillslopes: Scale effects and runoff transfer, *Water Resour. Res.*, vol. 44, 2008, W08411.
8. Hirano T, Terajima T, Nakamura T, Aoki F, Sakai M. Surface and near-surface runoff at slopes of the unmanaged coniferous forests and the natural deciduous forests in Nariki nested catchment, *Transactions of Japanese Geomorphological Union*, vol.29, No.3, 2008, pp. 255-280 (in japanese with english summary).
9. Murai H, Iwasaki Y, Studies on function of water and soil conservation based on forest land (I) influence of difference in forest condition upon water run-off, infiltration and soil erosion, *Bull. Gov. For. Exp. Stn.*, No.274, 1975, pp. 23-84 (in japanese with english summary).
10. Dunne T, Zhang WH, Aubry BF. Effects of rainfall, vegetation, and microtopography on infiltration and runoff, *Water Resour. Res.*, vol.29, 1991, pp. 2271-2285.
11. Sengi Y. Distribution of forested soil in Ishikawa Prefecture (1) distribution of sand dune immature soil, *Bull. Ishikawa-Ken For. Exp. Stn.*, No. 24, 1993, pp. 37-41 (in japanese).
12. Kato H, Onda Y, Ito S, Nanko K. Field measurement of infiltration rate using an oscillating nozzle rainfall simulator in devastated Hinoki plantation, *J. Jpn. Soc. Hydrol. Water Resour.*, vol.21, 2008, pp. 439-448 (japanese with english summary).
13. Hirata T. A mountain type infiltrometer. *J. Jpn. For. Soc.*, vol.38, 1956, pp. 34-40 (in japanese).

14. Hawkins RH, Cundy TW. Steady-state analysis of infiltration and overland flow for spatial-varied hillslopes, Water Resour. Bull., vol.23, 1987, pp. 251-256.
15. Tanaka S, Tokioka T. Evaluating infiltration-runoff by in situ rainfall simulation, Proc. 62nd Ann. Conf. Jpn. Soc. Civil Eng., 2007, CD-ROM 2-003 (in japanese).
16. Nakano M, Miyazaki T, Shiozawa S, Nishimura T. Physical and Environmental Analysis of Soils: University of Tokyo Press, 1995, pp. 89-114 (in japanese).
17. Miura S. Proposal for a new definition to evaluate the status of forest floor cover and floor cover percentage (FCP) from the viewpoint of the protection against raindrop splash, J. Jpn. For. Soc., vol. 82, 2000, pp. 132-140 (japanese with english summary).
18. Sadeghi SHR, Mizuyama T, Miyata S, Gomi T, Kosugi K, Fukushima T, Mizugaki S, Onda Y. Determinant factors of sediment graphs and rating loops in a reforested watershed, J. Hydrol., vol. 356, 2008, pp. 271-282.
19. N. Yukawa and Y. Onda, The influences of understories on the infiltration capacities of *Chamaecyparis obtusa* plantations (I) experimental results using a mist type rainfall simulator, J. Jpn. For. Soc., vol. 77, 1995, pp. 224-231 (japanese with english summary).
20. Onda Y, Yukawa N. The influences of understories on infiltration rates in *Chamaecyparis obtusa* plantations (II) laboratory experiments, J. Jpn. For. Soc., vol. 77, 1995, pp. 399-407 (japanese with english summary).
21. Medinski TV, Mills AJ, Esler KJ, Schmiedel U, Jürgens N. Do soil properties constrain species richness? Insights from boundary line analysis across several biomes in south western Africa, J. Arid Environ., vol. 74, 2010, pp. 1052-1060.