

MÉTODO DE EVALUACIÓN Y MITIGACIÓN DEL RIESGO DE EROSIÓN APLICADO A POLIDUCTOS EN ECOSISTEMAS DEL MONTE PATAGÓNICO

**Pablo Tchilinguirian, Alexis Guirin, Laura Genovesi
Natural Survey Consulting S.A.**

Abstract

En el ecosistema del Monte Patagónico, los eventos erosivos que se registran en las trazas de los poliductos suelen ser importantes, particularmente si las condiciones geomorfológicas y características constructivas favorecen la concentración del escurrimiento en la traza.

El trabajo a presentar propone un método de evaluación semi-cuantitativo del riesgo de erosión hídrica para ser aplicado en una traza de ducto hipotética que atraviesa el ecosistema del Monte Patagónico. El objetivo de este método es prevenir la degradación del suelo, disminuir los costos de restauración y anular el riesgo de destape de la cañería.

El análisis de riesgo se realiza integrando variables e índices que controlan la erosión hídrica pudiendo agruparlos según: a) características constructivas de la traza y b) características del terreno natural. Entre las primeras, tenemos al desnivel de la traza con respecto al terreno natural en ambos márgenes y al ancho de los bordos de tierra en la porción central de la traza. Entre las segundas, se incluye: pendiente, longitud, erosionabilidad del suelo, profundidad de los cauces atravesados y el caudal que es aportado a la traza desde el terreno aledaño y el que se acumula en ella.

Este paper explica como varían cada una de los índices mediante tablas y blocks diagramas que resumen situaciones de máxima y mínima.

Para el caso del caudal acumulado a lo largo de la traza, se propone el método de la Curva Número que permite conocer la escorrentía en un área dada según cobertura vegetal y suelos dominantes de Patagonia Extraandina. Finalmente todos estos índices se integran en un único gráfico que permite visualizar en cada progresiva, cual es la variable más comprometida en la erosión y conocer la medida preventiva más apropiada.

INTRODUCCIÓN

La actividad petrolera Argentina tiene uno de los mayores polos de desarrollo en el ecosistema del monte patagónico. La mayor densidad de instalaciones, entre las que se destacan explanadas de pozos, caminos y poliductos, se ubican básicamente en el centro-este y norte de la provincia del Neuquén y el oeste de la provincia de Río Negro.

Aunque el clima es semiárido y las precipitaciones generalmente no alcanzan a superar los 250 mm/año, los eventos erosivos que se registran en las trazas de los poliductos, suelen ser importantes si las condiciones geomorfológicas e hidrográficas y las características constructivas, favorecen la concentración del escurrimiento superficial a lo largo de la traza.

La presente contribución, propone un método de evaluación semi-cuantitativo del riesgo de erosión hídrica para ser aplicado en las trazas de los ductos que atraviesan el ecosistema de la Patagonia Extraandina. Dicha evaluación, puede ser tenida en cuenta tanto, durante las tareas previas como las

posteriores, a la construcción del ducto y tienen como objetivo conocer de antemano, las medidas de mitigación contra la erosión hídrica.

Zonificación del Riesgo; Una Herramienta Preventiva y Correctiva

La construcción de una traza implica el cambio de los factores y procesos naturales del suelo. Entre los cambios más notorios, se destaca el incremento del coeficiente de escurrimiento por medio de la compactación, la remoción vegetal, el alisamiento de la superficie, el cambio en el sentido del escurrimiento y la destrucción del suelo arenoso formado por los montículos de arena, denominados nebkhas (Tchilinguirian, 2001 y 2002).

Estas alteraciones determinan que el riesgo de la erosión hídrica aumente en la traza y pueda constituir un problema futuro a la cañería. La importancia de evaluar el riesgo de erosión en una traza tiene tres justificaciones fundamentales: prevenir la expansión de la degradación del suelo, disminuir los costos de restauración y mantenimiento y anular el riesgo de destape y daño de la cañería.

La degradación del suelo, luego de la construcción, es un proceso que tiene lugar si hay un mal manejo del drenaje pluvial de la traza. Consecuentemente, los fenómenos erosivos se extienden fuera de la traza y afectan al terreno aledaño, lo que puede provocar pleitos entre el propietario y la empresa. Asimismo, si los fenómenos erosivos son continuos a lo largo del tiempo y de mayor magnitud que en el área natural, la posibilidad de revegetación de la pista será menor y el impacto sobre el suelo y la vegetación aumentará.

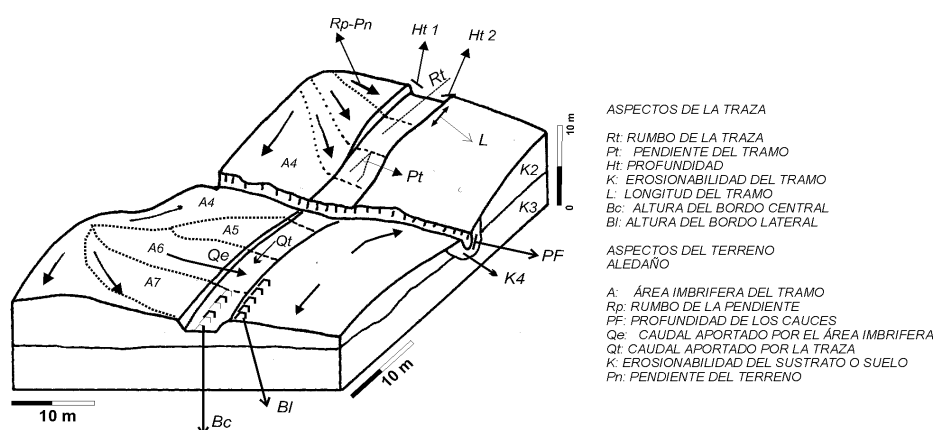
Los costos de mantenimiento, cuya valoración más directa surge a partir del volumen de los movimientos de suelos, del costo del flete y de las horas máquina para restaurar surcos y destapes, aumenta considerablemente con el incremento de la erosión.

La metodología propuesta no es aplicada a un ducto en particular si lo es, a una traza imaginaria la cual presenta las consideraciones ambientales más frecuentes de encontrar en la Patagonia Extraandina y las constructivas normalmente aplicadas.

Variables que controlan la erosión en una traza

El análisis del riesgo se obtiene integrado una serie de variables e índices que controlan la erosión hídrica (Figura 1). Estas variables representan o bien, características constructivas de la traza o bien del terreno natural.

Figura 1. Variables para el cálculo del método

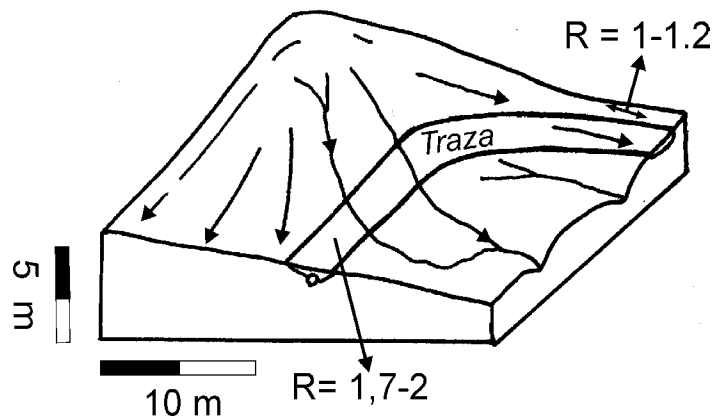


Las variables constructivas que controlan la erosión en una traza corresponden al desnivel que presenta la traza con respecto al terreno natural en sus dos márgenes (Ht1 y Ht2) y al ancho de los bordos de tierra en la parte central (Bc) o lateral de la traza (Bl).

Las variables naturales corresponden a la pendiente (Pn), la longitud (L), la erosionabilidad del suelo de la traza (K), el caudal que es aportado a la traza desde el terreno aledaño (Qe), el que se acumula a lo largo de la traza (Qt) y la profundidad de los cauces que la atraviesan (Pf).

La oblicuidad que tiene la traza con respecto a la pendiente máxima del terreno se valora con el índice denominado R. Este índice se obtiene mediante la relación R_t/R_p , donde R_t es el rumbo de la traza y R_p el rumbo de la pendiente máxima. Valores de $R = 1$ indican trazas paralelas a la pendiente máxima, mientras valores iguales a 2 corresponden a trazas con direcciones transversales. Este índice tiene influencia directa en la erosión, debido a que una traza oblicua, puede entrapar un caudal de escurrimiento del terreno aledaño mayor, que una traza dispuesta en forma trasversal a la pendiente. Asimismo, en trazas paralelas a la pendiente, la erosión es máxima con respecto a trazas trasversales.

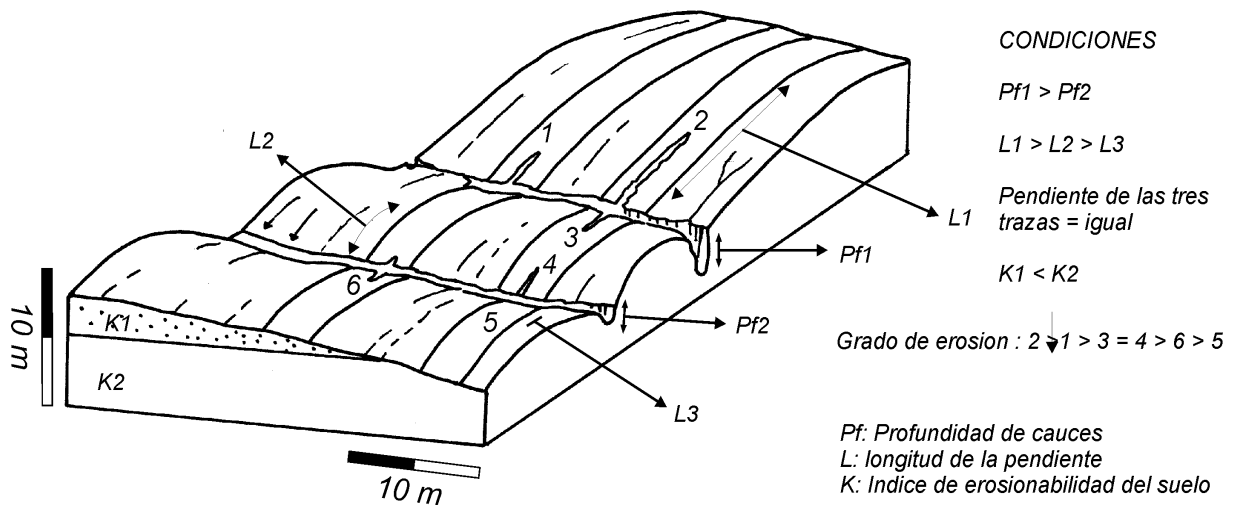
Figura 2. Relación entre índices R y oblicuidad de la traza.



Los valores del gradiente y longitud de la pendiente se obtienen de la planialtimetría adquirida por el servicio topográfico. Ambas, ejercen una gran influencia en la erosión. Según Morgan (1997) el efecto del gradiente (P) y la longitud (L) controlan en forma exponencial a la erosión. El aumento de la erosión se presenta como resultado del incremento de la velocidad y volumen de la esorrentía.

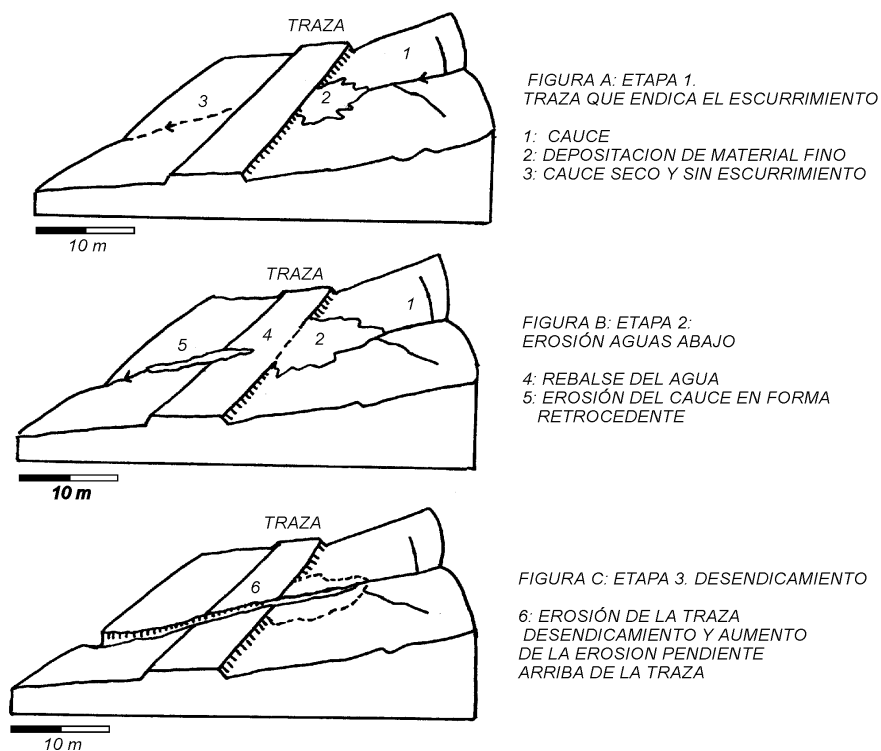
La variable Pf, la cual representa la profundidad de los cauces atravesados por la traza, es tomada en cuenta por el control que ejerce el nivel de base en la erosión. De esta forma, cuando el escurrimiento superficial que drena a lo largo de la traza desemboca en un cauce que tiene una profundidad Pf mayor, que la profundidad de enterramiento del ducto, se origina una onda de erosión en retroceso, que avanza pendiente arriba a lo largo de la traza. El aumento de Pf determina que el surco erosivo avance más distancia pendiente arriba y sea más profundo.

Figura 3. Efecto en la erosión correspondiente a las variables, Pf y la erosionabilidad del sustrato, K



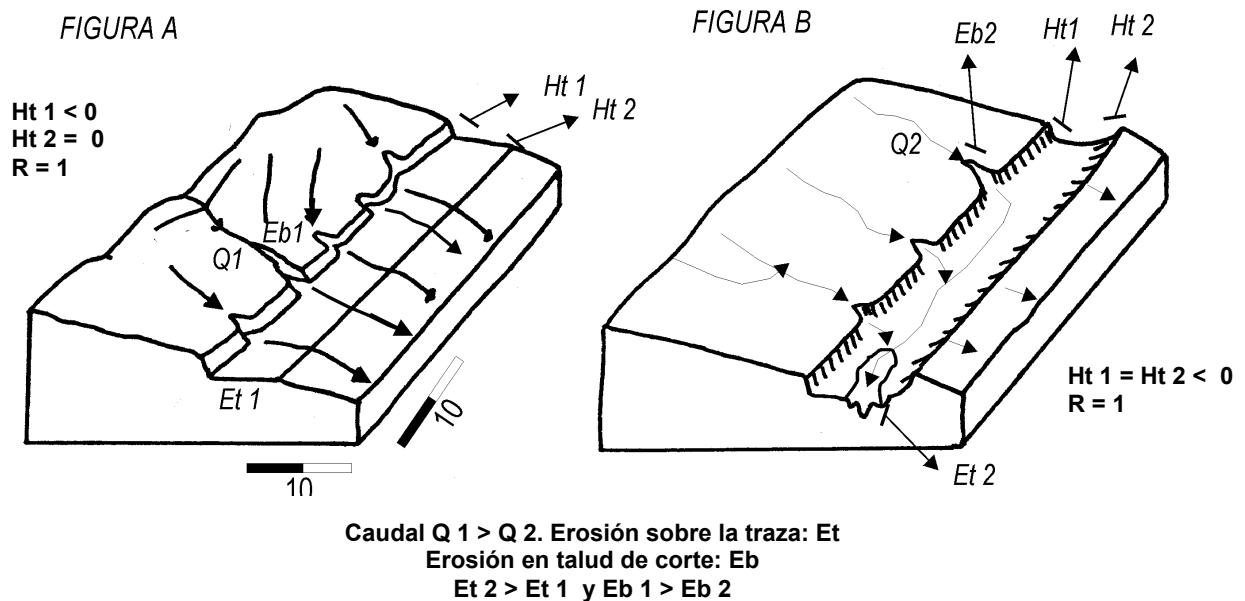
Los valores de Ht, que representan el desnivel de la traza con respecto al terreno natural, condicionan la dirección y la carga de sedimentos del escurrimiento. Valores de $Ht > 0$ indica que la traza está sobrenivelada y en consecuencia el escurrimiento encuentra un obstáculo. Bajo esta situación pueden ocurrir dos fenómenos el primero, que se origine un efecto dique si la pendiente es transversal a la traza y el segundo, que el drenaje escurra en forma paralela a la traza si la pendiente es oblicua o paralela a la traza ($R > 1$ y < 2). En el primer caso, el efecto dique trae aparejado variaciones en la carga de lecho del cauce, el cual provocará erosión aguas bajo de la traza y una consecuente destape del ducto (Figura 4).

Figura 4. Efecto de la variable Ht en la traza



En el caso que la traza esté excavada en sus dos bordes ($Ht1 = Ht2 < 0$), el escurrimiento será capturado enteramente por la traza (Figura 5B). Hay situaciones intermedias, donde $Ht1 < 0$ y $Ht2 = 0$ (Figura 5A) por lo que el escurrimiento no es capturado si el valor de R es mayor a 1. En ambos casos existe un elevado riesgo de erosión en el talud de corte donde se formarán cárcavas como respuesta al cambio del nivel de base originado por la excavación. Estos surcos de erosión tendrán una erosión retrogradante pendiente arriba del talud, siendo mayor cuando mayor sea el caudal de entrada la pendiente del terreno (P_n) y la erosionabilidad del sustrato. (K)

Figura 5. Influencia de la profundidad de la traza y la erosión.



Referencias: Figura A: Trazas excavadas en un solo margen, Figura B: Trazas excavadas en los dos márgenes.

La influencia de los bordos en la traza del ducto puede reducir o aumentar la erosión. Este último caso se presenta cuando el bordo central atrapa el escurrimiento difuso y lo encauza en la traza (Figura 6). Bajo esta situación, si todas las otras variables comentadas (pendiente, erosionabilidad y caudal) son constantes, la erosión será mayor cuando más elevado y ancho sea el bordo central debido a que la erosión actuará durante mayor tiempo antes de que el bordo sea erosionado.

Figura 6. Efecto del bordo central en la erosión de las trazas

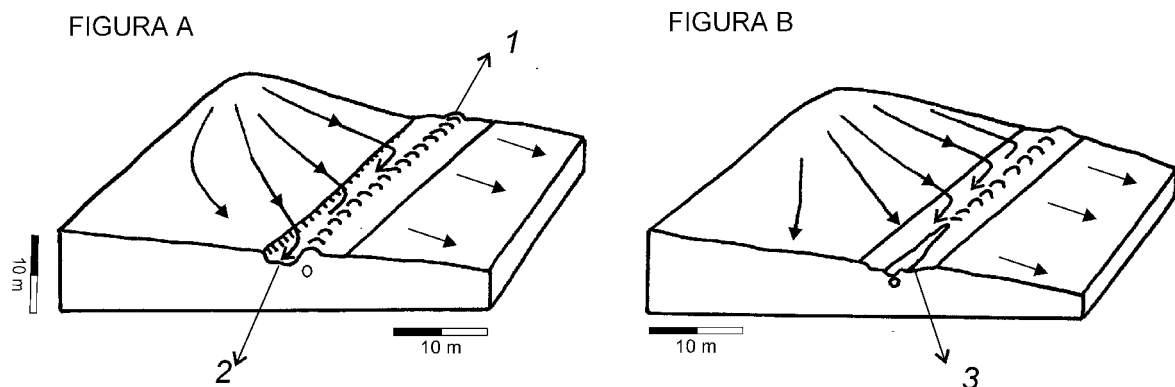
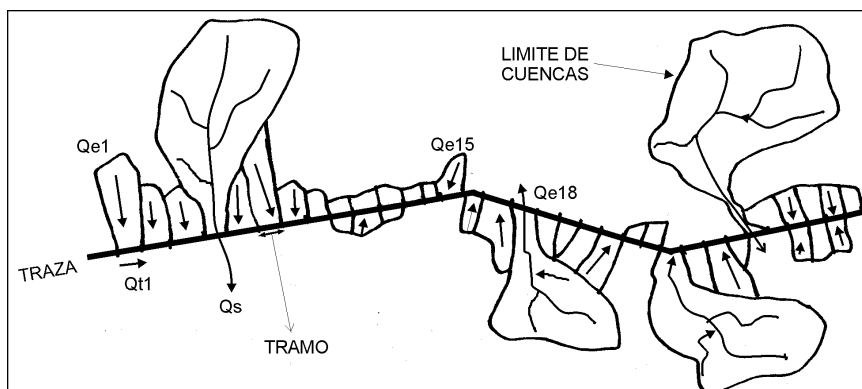


Figura A: El bordo central atrapa el escurrimiento difuso y provoca la erosión del camino de asistencia, **Figura B:** El bordo central captura el escurrimiento y erosiona el material menos consolidado del material de tapada afectando el caño. 1: bordo central, 2: camino de asistencia erosionado, 3: cárcava.

Caudal acumulado en la traza

El valor de Q_t corresponde al caudal acumulado en la progresiva analizada. Este caudal puede provenir tanto, desde zonas aledañas (Q_e) como de la misma traza (Figura 7).

Figura 7. Esquema de entrada y salida de caudales a lo largo de una traza hipotética.



Referencias: Q_s : caudal de salida de la traza, Q_e 1: caudal de entrada a la traza del terreno aledaño a la altura de la progresiva 1, Q_t 1: caudal acumulado en la traza en la progresiva 1.

El valor de Q_e se calcula a partir del método de la curva número definido por el U.S Soil Conservation Service (Tragsa-Trasatec, 1994) y se basa en la estimación directa de la escorrentía superficial de una lluvia aislada (para este caso 50 mm, en 3 horas), a partir de las características del suelo, uso del mismo y de su cubierta vegetal. El cálculo del caudal aportado a la traza (Q_e mm) se realiza con la siguiente fórmula,

$$Q_e = (P - 0,2S)^2 / (P + 0,8S) \quad [1]$$

donde P = precipitación (mm), S es igual a

$$S = (25400/N) - 254 \quad [2]$$

Siendo N el valor de la curva número (CN)

Este último parámetro toma valores entre 35 a 76 (ver Fig. 10) según el tipo de complejo suelo – vegetación el cual a su vez, define las condiciones hidrológicas de la región atravesada que para este caso particular, corresponde a una traza imaginaria ubicada en Patagonia Extraandina (NO de la provincia del Neuquén). De esta forma, si se considera que el valor de la intensidad de lluvia es constante a lo largo de la región atravesada por la traza, el valor de Q_e variará cuando se modifique el tipo de cubierta atravesada (matas, herbáceas, etc.), el tipo de complejo suelo – vegetación (CN) y el estado hidrológico el cual depende a su vez del porcentaje de cobertura vegetal del suelo. Debe tenerse en cuenta en el estudio de las escorrentías la cantidad de lluvia caída los cinco días previos al análisis de la situación, esto permitirá hacer correcciones al valor de la CN lo que terminará por afectar el valor final de Q_e .

Los valores de Q_e , indicados en la Figura 9 fueron obtenidos según la ecuación [1] teniendo en cuenta la condición I de la Figura 8.

Figura 8. Condiciones precedentes de humedad

Condición	Período Húmedo	Período Seco
I	< de 12,5 mm	< 35,5 mm
II	Entre 12,5 y 28 mm	Entre 35,5 y 53 mm
III	> de 28 mm	> 53 mm

Una vez obtenido el caudal (Q_e), el cual es una medida del escurrimiento por unidad de área ante una precipitación dada, se debe ajustar a la condición real del terreno. De esta forma, el valor del caudal Q_e se integra según el área de la cuenca en cuestión y se obtiene el caudal de entrada a la traza. El método de calculo se puede realizar mediante cualquier método paramétrico o empírico. El cálculo del área (A) se analiza a partir del análisis geomorfológico de imágenes satelitales a escala 1:75000–1:100000 y a partir de mapas topográficos si estos últimos tienen una equidistancia y escala apropiada (Figura 1). Finalmente, obtenidos los hipotéticos caudales de entrada a la traza, se los plotea en función de la progresiva (Figura 7). Mediante este grafico se puede verificar en que medida se acumula y dispersa el escurrimiento en la traza, teniendo en cuenta que esta se halla al mismo nivel que el terreno ($H_t = 0$). Este primer análisis permitirá determinar a priori, cuales son las zonas de mayor riesgo de erosión asociadas a tramos de traza donde el escurrimiento potencialmente puede ser capturado (Figura 10 referencia C), endicado (Figura 10 referencia D y E) o alterado.

Figura 9. Estimación potencial del escurrimiento de cada unidad geomorfológica más representativa del monte Patagónico Extraandino del área de estudio.

Geoforma	Cobertura Vegetal (%)	Suelos Dominantes	Grupo	CN	S	Q (I)	K
Terraza Nivel I, II, III, IV, V, VI del río Colorado, Limay y Neuquén	30-70	Paleargides petrocálcicos	B	54	216,37	0,20	0,55
Terrazas Nivel I, II, III, IV, V cubiertos por mantos eólicos	30-70	Torripsamente s típicos	A	35	471,31	4,60	0,15
Pedimentos de flanco con gravas finas	30-70	Calciortides típicos	B	54	216,37	0,20	0,2
Pedimentos con arenas limosas de la F. Allen y F. Jagüel	30-70	Torriortentes típicos	C	64	142,88	2,79	0,6
Pendientes y escarpas cubiertas por mantos eólicos	30-70	Torripsamente s típicos	A	35	471,31	4,60	0,6
Playas	< 30	Torriortentes salinos	C	70	108,86	5,81	0,2
Abanicos aluviales	30-70	Torriortentes típicos	A	35	471,71	4,60	0,6
Planicies estructurales por arrasamiento	30-70	Torriortentes líticos	B	54	216,37	0,20	0,2
Desmontes petroleros	<5	Petrocálsicos o roca	D	76	80,21	10,10	0,05

Geoforma	Cobertura Vegetal (%)	Suelos Dominantes	Grupo	CN	S	Q (I)	K
Escarpas de erosión rocosas	<30	Torriortentes líticos, fase gruesa y erosionada	D	76	80,21	10,10	0,16
	<5	Areniscas (F. Huincul, F. Candeleros)	D	76	80,21	10,10	0,05
	<5	Limolitas (F. Jagüel, F. Lisandro, F. Allen)	D	76	80,21	10,10	0,1

Q (I). Caudal, según condición I de la Figura 8.

El Grupo define a los suelos los cuales se resumen a continuación:

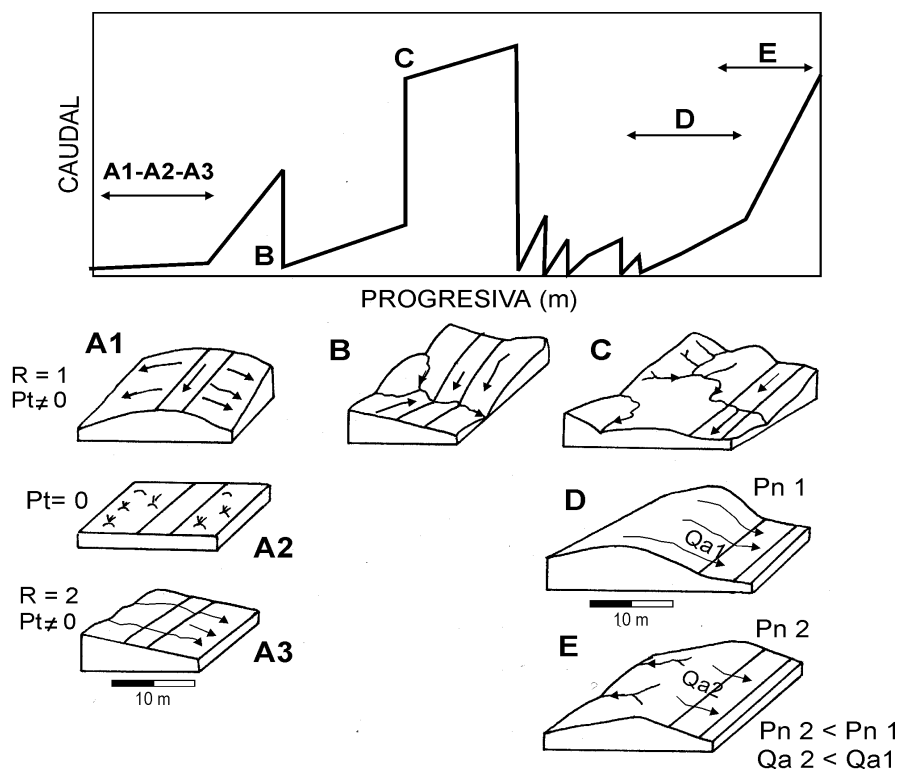
Grupo A: Es el que ofrece menor escorrentía. Incluye los suelos que presentan mayor permeabilidad, incluso cuando están saturados. Comprende los terrenos profundos, sueltos, con predominio de arena o grava y con muy poco limo o arcilla. (arenosos, arenosos – limosos, loes, etc.)

Grupo B: Incluye los suelos de moderada permeabilidad cuando están saturados, comprendiendo los terrenos arenosos menos profundos que los del Grupo A, aquellos otros de textura franco arenosa de mediana profundidad y los francos profundos.

Grupo C: Incluye los suelos que ofrecen poca permeabilidad cuando están saturados, por presentar un estrato impermeable que dificulta la infiltración o porque, en conjunto, su textura es franco arcillosa o arcillosa.

Grupo D: Es el que ofrece mayor escorrentía. Incluye los suelos que presentan gran impermeabilidad, tales como los terrenos muy arcillosos profundos con alto grado de tumefacción, los terrenos que presentan en la superficie o cerca de la misma una capa de arcilla muy impermeable y aquellos otros con subsuelos muy impermeable próximo a la superficie.

Figura 10. Caudales acumulados en una hipotético ducto y su relación con la morfología de la traza



Referencias: A1, y A3: Trazas que dispersan el escurrimiento, A2: traza en terrenos planos, sin escurrimiento que se acumule, B: Escurrimiento que se dispersa atravesando la traza, C: Captura parcial del escurrimiento la traza, D y E: Acumulación de escurrimiento según la pendiente y su longitud. R: Oblicuidad de la traza, Pt: pendiente de la traza, Qe: caudal de entrada a la traza desde el terreno aledaño.

Índice de Erosionabilidad

La erosionabilidad se valora a partir del índice de erosionabilidad propuesto por Wischmeier y Smith (1978). El cálculo del índice de erosionabilidad (K) es independiente de la pendiente y depende básicamente de la permeabilidad, porcentaje de materia orgánica, estructura y en el caso de las rocas, de la consolidación. En algunas ocasiones, si el desmonte de la traza es mayor a 20 cm, el cálculo del índice de erosionabilidad a tener en cuenta tiene que corresponder al horizonte C o B. En algunas situaciones, la traza se ubica sobre un relleno. Los valores para calcular el valor de la erosionabilidad (K) para Neuquén se pueden obtener de la información edáfica publicada por el CFI (1990) y la geología mapeada por el SEGEMAR. Una estimación de sus valores se transcribe en la Figura 9. Valores más cercanos a 1 indican sustratos más susceptibles a la erosión hídrica con respecto a suelos con valores tendientes a 0.

Integración de variables y análisis final del riesgo

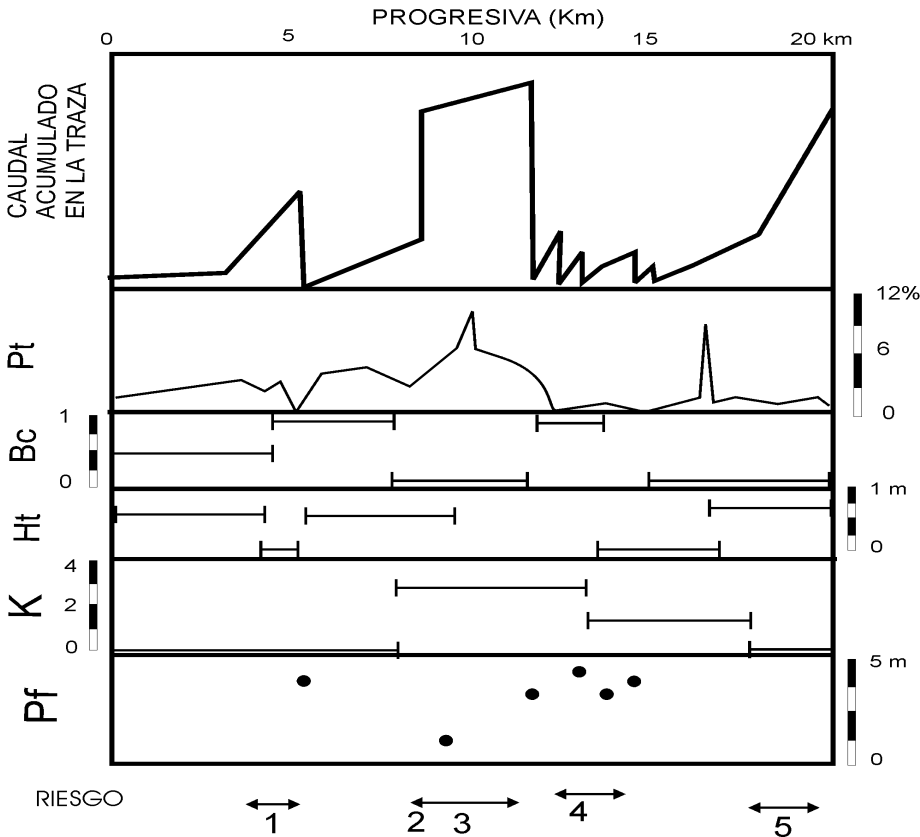
El riesgo de erosión hídrica se evalúa integrado toda la información a lo largo de la progresiva de la traza (Figura 11 y Figura 12). Los valores más elevados de riesgo se presentarán cuando simultáneamente se combinen las siguientes condiciones: $R = 1$, y los valores de $Ht1$ y $Ht2$, $P.L$, K , Pf y A adquieran los valores más elevados en la traza. Bajo dicha circunstancia, la traza se comportará como un canal y toda el agua superficial del terreno, circundante será capturada por la

traza. La erosión es acelerada cuando Pf tome valores mayores que la profundidad a la que se encuentre el ducto y los valores de K sean bajos ($< 0,5$). El valor de riesgo más bajo se presentará cuando $R = 1$, $Ht2 = Ht1 = 0$, K presente valores elevados (roca endurecida) y el área A de cuencas atravesadas no exista. En esta situación, el escurrimiento superficial atravesará la traza provocando una mínima erosión o acumulación de sedimentos. Por supuesto que existen situaciones intermedias, donde solo un factor es el que ejerce el control dominante de la erosión.

Figura 11. Condiciones extremas de las principales variables que regulan la erosión en la traza

Variable	Riesgo alto	Riesgo bajo
Qe	Valores altos	0
Qt	Valores altos	0
K	Valores bajos ($<0,2$)	1
Ht	$\neq 0$	0
Pt	Valores altos	$<0,05 \%$
Profundización fluvial (Pf)	mayor que enterramiento de ducto	menor que enterramiento de ducto
R	1	2
Procesos geomórficos	Debris flow	Arena o arcilla o acumulación

Figura 12. Integración de variables a lo largo de la traza.



Referencias: 1: Endicamiento por presencia de un bordo central en el cauce, 2: captura del escurrimiento, 3: Erosión en la traza por gran caudal, 4: erosión encauzada y acelerada por K

bajo y Pf alto, 5: erosión en la traza debido a que el escurrimiento se encauza por la presencia de $H_t > 0$.

El riesgo de erosión, también se encuentra en los cruces de cauces con elevada profundización fluvial (Pf) o con eventos aluvionales o de remoción en masa. Aunque estos fenómenos son poco frecuentes están presentes en la Sierra Negra, Huantraico, Chachauen y a ambos márgenes del Río Negro, Neuquén y del Bajo de Añelo. La evaluación del riesgo de daño y erosión a los ductos en estos cruces supera el alcance de esta publicación, sin embargo algunos detalles pueden consultarse en Tchilinguirian y otros (2002).

Medidas preventivas y correctivas

Mediante el análisis de los diagramas de riesgo, se puede entender cual es el factor más importante que condiciona la erosión en un tramo determinado de la traza y proceder a mitigar o adecuar el proceso erosivo mediante el control del factor que condiciona la erosión.

En caso de ser el factor Q se sugiere controlar la erosión mediante la construcción de sangrías o dispersores de flujo, los cuales estarán distanciados de forma tal, que el escurrimiento no adquiera carácter turbulento.. En caso de capturas de cauces, se sugiere mejorar la zona de drenaje a través de la traza mediante canalización, retirada de los bordos central y lateral y colocar bordos en el punto de captura.

En el caso de que el factor E sea el controlante, se puede adecuar el suelo mediante corrugados, escareos, colocación de gravas o vegetación de crecimiento rápido en el ultimo de los casos. Estas medidas tienden a aumentar la rugosidad de la superficie, aumentar la infiltración y disminuir la velocidad del flujo.

Resultados y conclusiones

El rol del mapeo geomorfológico, el comportamiento del drenaje pluvial y las características constructivas a la misma escala que los mapas planialtimétricos constituye la mejor herramienta para evaluar el riesgo de erosión hídrica a lo largo de la traza de los poliductos.

La mejor herramienta preventiva, como siempre constituye la correcta elección de la traza en función de las características geomorfológicas-topográficas y litológicas. En caso de evaluar alternativas en función del riesgo de la erosión, se puede utilizar los diagramas de integración expuestos (Figura 12), ya que permiten determinar cualitativamente el riesgo para toda la traza como para cada tramo en particular.

El control del drenaje pluvial constituye la principal fundamento preventivo-correctivo en el control de la erosión hídrica. Dicho control se puede lograr evitando sobreexcavar la traza, evitando la captura de cauces, y no permitiendo que el bordo central o lateral atrape el flujo difuso y lo concentre. De esta forma, el plan de lucha contra la erosión o su mitigación no es una tarea a realizar solamente durante la etapa de la restauración de la pista del ducto.

Esta metodología de trabajo es aplicada solamente para el caso de los ecosistemas áridos y semiáridos patagónicos, ya que otros sistemas naturales contienen otras variables no incluidas en esta contribución, como ser el efecto de la cobertura vegetal, la protección por revegetación de especies colonizadoras de crecimiento rápido, los procesos de reptaje-solifluxión y deslizamientos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la autorización y colaboración brindada por Chevron San Jorge SRL, para la publicación de la presente contribución al congreso. Asimismo agradecemos la ayuda prestada en la confección de mapas por la cartógrafa Silvia Altobelli.

BIBLIOGRAFÍA

CFI (1990). Atlas de suelos de la Provincia del Neuquén.

Morgan R.P.C. (1997). Erosión y conservación del suelo, 1997. Ediciones Mundi Presa.

SEGEMAR (1999). Mapa geológico del departamento de Añelo.

SEGEMAR (1999). Mapa geológico de las hojas 3769-IV, Catriel, 3969-II, Neuquen; 3966-I, Gobernador Duval; 3966-II Puelches y 3963-I, Río Colorado.

TRAGSA-TRAGSATEC, (1994). Restauración hidrológico-forestal de cuencas y control de la erosión. Ediciones Mundi Presa. Madrid.

Tchilinguirian P., Guirin A. y Genovesi L., (2002). Evaluación del riesgo aluvional en áreas petroleras mediante el análisis geomorfológico en ecosistemas semiáridos. Provincia del Neuquén. V Congreso de Hidrocarburos. Mar del Plata.

Tchilinguirian P., (2002). Origen y Evolución de los Nebkhas. Provincias del Neuquén y Río Negro. XII Congreso Geológico Argentino. Calafate. En prensa.

Tchilinguirian P., Cagnoni M. y Zuleta G. A., (2001). Regeneración de propiedades abióticas en explanadas petroleras abandonadas del Monte Patagónico. V Congreso Latinoamericano de Ecología. Universidad Nacional de Jujuy. Resúmenes.

Wischmeier W.H. and Smith D.D, (1978). Predicting rainfall erosion losses. Agriculture Handbook N° 537. Washington D.C.