

---

## CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS HIDROLÓGICOS

El estudio se concentró en la documentación de los sistemas hidrológicos superficial y subterráneo contenidos en la finca del **Vertedero Municipal de Yauco**. La recopilación de datos se llevó a cabo mediante observaciones de campo, hincado de barrenos exploratorios y pozos de monitoreo, realización de pruebas hidráulicas, examen de mapas (topográfico, geológico, entre otros), planos de la facilidad y fotos aéreas, y la revisión de publicaciones, estudios y otros documentos pertinentes provistos por la firma operadora del vertedero, **LM Waste Service Corp.**

El hincado de barrenos exploratorios y construcción de pozos de monitoreo (detalles en **Tabla 1**) fue realizado por los ingenieros geotécnicos **Victor E. Rivera Associates**, a tenor con la metodología y especificaciones aceptadas. La distribución y ubicación de siete (7) barrenos exploratorios y seis (6) pozos de monitoreo se configuró a los fines de garantizar resultados representativos de la condición hidrogeológica existente. La profundidad de los barrenos exploratorios fluctuó entre los 35 y 60 m, siendo determinada en función de la ubicación y espesor de la unidad acuífera y la detección del subyacente estrato de lodolita o conglomerado, límites estratigráficos de la formación. El examen de las muestras geológicas (obtenidas a intervalos de 1.5 m) fue realizado por el geólogo-ingeniero **Mario Soriano Ressi**, quien describió y caracterizó la condición litológica y estratigrafía de la localidad de estudio.

La construcción de los pozos de monitoreo se llevó a cabo a tenor con la información hidrogeológica obtenida de los barrenos exploratorios: ubicación y espesor de la unidad acuífera, nivel de agua, condición hidrostática y calidad mineral de las aguas. Los pozos fueron terminados bajo la unidad acuífera con camisilla de plástico PVC de dos (2) pulgadas de diámetro y perforada a través del espesor saturado de la unidad.

Mediante una “*corrida de niveles y calidad*” (realizada el 29 de marzo de 2007 y que incluyó los tres (3) pozos de monitoreo existentes) se preparó un mapa potenciométrico con el **método de triangulación** (*Driscoll, 1989*) y se determinó la dirección del flujo y salinidad de las aguas. Las propiedades hidráulicas se obtuvieron de pruebas realizadas en pozos seleccionados utilizando el **método de porrazo** (slug) y de **extricación** (bailer method). Los valores se computaron a partir de curvas de recuperación y la aplicación de modelos analíticos correspondientes (ver **Anejos**).

**Tabla 1.** Localización geográfica y datos de construcción relevantes a los pozos de monitoreo instalados en el Vertedero Municipal de Yauco.

Pozo	Coordenadas		Elevación (m) (SNM)	Barreno Exploratorio		Pozo de Monitoreo	
	X	Y		Profundidad (m) (BLS)	Nivel de Agua	Profundidad (m) (BLS)	Intervalo Rejillado
MW-101	153862.14	218601.21	63.93	35.05	14.48	21.31	13.7 - 19.8
MW-102	154077.62	218026.10	128.78	60.96	25.60	28.94	21.3 - 27.4
MW-103	154215.95	217805.99	109.70	15.80	nd	no completado	
MW-104	154808.31	217695.97	82.34	47.24	25.90	30.46	25.9 - 29.0
MW-105	155051.03	217951.73	129.00	56.39	36.27	47.22	44.2- 45.7
MW-106	155007.24	218420.89	141.37	42.67	21.94	25.88	21.3 - 24.4
MW-107	154546.85	218492.40	120.15	25.00	22.86	32.00	27.4 - 30.5
MW-1 *	154232.52	218753.94	74.63	53.34	45.72	25.60	16.4 - 25.6
MW-2 *	152512.68	217919.28	110.90	76.20	25.60	32.00	22.8 - 32.0
MW-3 *	154732.34	218174.37	116.08	15.24	10.30	15.24	6.0 -15.2

\* Pozos existentes - datos de construcción según bitácora de contratista, provista por LM Corp.

## Aguas Superficiales

### Ocurrencia

Debido a que el potencial de evapotranspiración (2,020 mm) en las colinas y llanos costeros de las cuencas hidrográficas del Río Yauco y el Río Loco duplica la recarga de agua provista por la precipitación (780 mm), la ocurrencia de corrientes de agua superficial en los cauces de drenaje que sirven la localidad de estudio resulta un evento extraordinario. Como factor agravante, de la porción residual una parte se infiltrará al subsuelo y otra será almacenada en la vegetación de las áreas de bosque. Lo cierto es, que solo bajo eventos de precipitación de gran intensidad y duración se podría generar suficiente escorrentía para sostener un flujo a través de las hondonadas de drenaje capaz de accesar el cauce principal de dichos ríos.

En adición a los factores mencionados, el surgimiento de corrientes en los cauces de drenaje que sirven los terrenos del vertedero está restringido por la limitada extensión del área de captación correspondiente a dichos cauces. Por otra parte, la condición geológica y topográfica de los terrenos no permite aportaciones de caudal provenientes de sistemas de drenaje subterráneo, factor que típicamente sostiene el flujo básico de sistemas superficiales lóticos. Lo cierto es, que las aguas subterráneas en la Formación Juana Díaz están contenidas en una unidad cuya posición litológica, entre otros factores, impide el afloramiento de estas al sistema de drenaje superficial.

### Patrón de Drenaje

La dinámica del drenaje superficial es función de las condiciones climáticas, topográficas, geológicas, suelos y usos del terreno que presenta un área en particular. El drenaje inicia con la **escorrentía** (*flujo de agua sobre el terreno*) que se genera cuando el caudal de precipitación excede la tasa de infiltración, lo que ocurre por lo

general durante períodos de lluvias intensas y terrenos saturados. El movimiento de las aguas terrestres responde a la fuerza de gravedad, por lo que el flujo de escorrentía habrá de ocurrir a través de un gradiente altitudinal, esto es, hacia el punto de menor elevación.

La mayor parte de los terrenos donde ubica el vertedero pertenecen a la cuenca de drenaje del Río Yauco mientras que una porción de la margen norte está contenida en la cuenca del Río Loco (Figura 3). Se entiende que el origen de los cauces de *primer y segundo orden* que sirven la localidad fue promovido estructuralmente, esto es, por actividad tectónica que facilitó el surgimiento de rutas de menor resistencia.

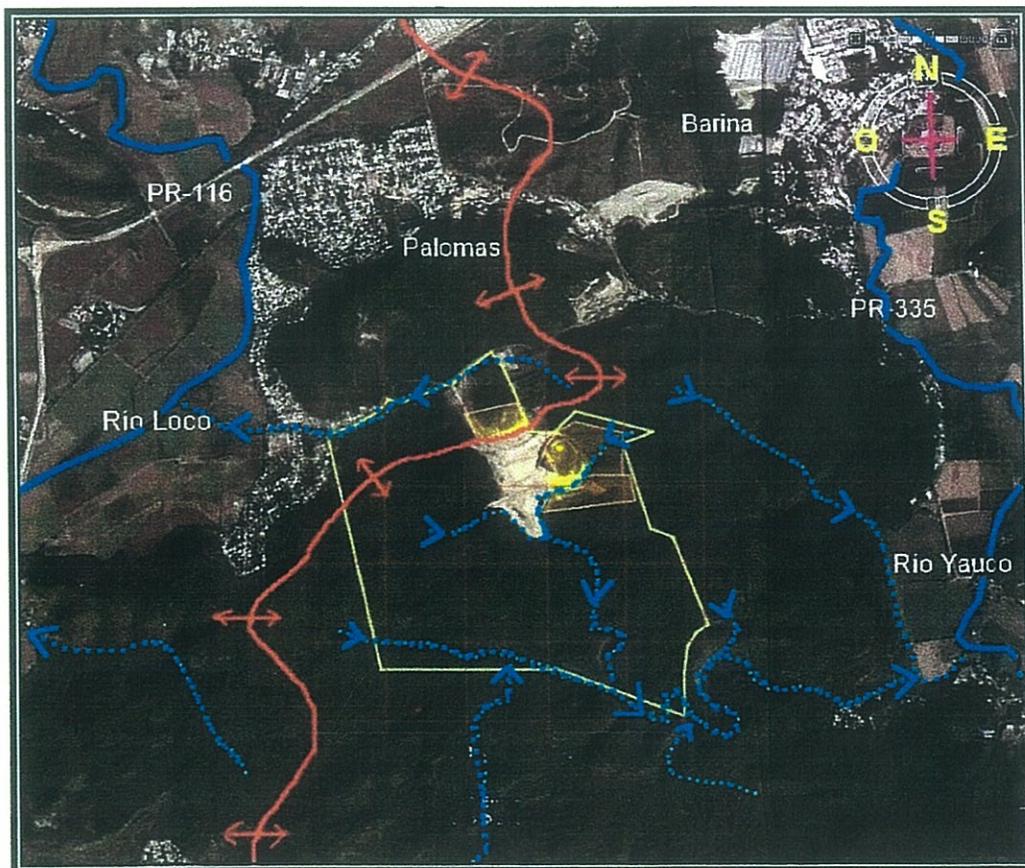
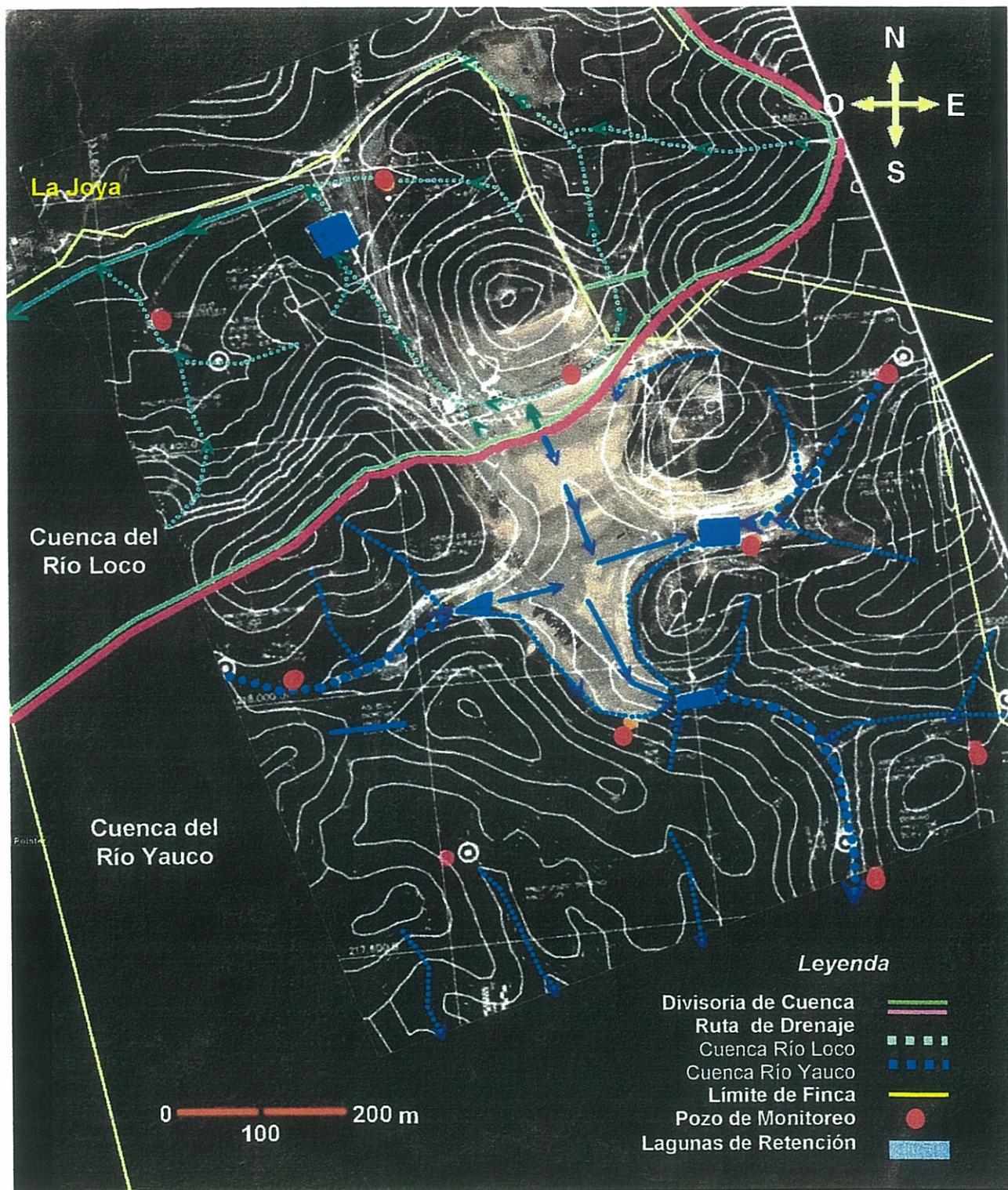


Figura 3. Divisoria de cuencas del Río Yauco y Río Loco y cauces de primer y segundo orden en la localidad del Vertedero Municipal de Yauco.

El área donde aflora la unidad basal de la **Formación Juana Díaz** está cubierta principalmente por suelos de la asociación ***Descalabrado-Jácana-San Germán***, que exhiben una permeabilidad moderada (0.6 a 2.0 plg/hr} (*Gierbolini, 1975*). Se entiende que por su alto contenido de arcilla, la razón de infiltración de estos suelos disminuye según aumenta la humedad, por lo que en áreas de pendientes pronunciadas se generará una escorrentía rápida.

Por otra parte, en las áreas donde aflora la unidad caliza se espera el surgimiento de un caudal de escorrentía menor, pues la carencia de suelos y el desarrollo de porosidad secundaria en la roca caliza promoverá una razón de infiltración mayor. Finalmente es menester indicar que la escorrentía generada sobre las áreas de relleno sanitario, así como también el afloramiento de lixiviados drenarán a las charcas de retención correspondientes. Solo cuando la capacidad de almacenamiento de las charcas sea excedida tendrán estas aguas el potencial de accesar los cauces de drenaje principales. En la **Figura 4** se presenta una conceptualización del patrón de drenaje en las inmediaciones del vertedero.



**Figura 4.** Sistema de drenaje superficial y rutas preferenciales de escorrentía en la finca del Vertedero Municipal de Yauco.

## Aguas Subterráneas

### Ocurrencia

En la localidad de estudio las aguas subterráneas están contenidas en un estrato cuya baja permeabilidad y pobre conductividad hidráulica impide el aprovechamiento de estas como fuente de abasto (condición contraria al concepto que típicamente define a un “acuífero”). No obstante, la capacidad de dicho estrato para transmitir agua resulta suficiente para permitir la caracterización del sistema de drenaje subterráneo, condición que lo cualifica como “acuitardo”. Por otra parte, en una secuencia estratigráfica la clasificación de estratos como acuíferos o acuitardos es una determinación relativa que responderá al grado de conductividad hidráulica o permeabilidad que presenten (*Freeze & Cherry, 1979*). Por ejemplo, en una secuencia de arena y cienos, los cienos se consideran acuitardos, mientras que en una secuencia de cieno y arcilla serían acuífera.

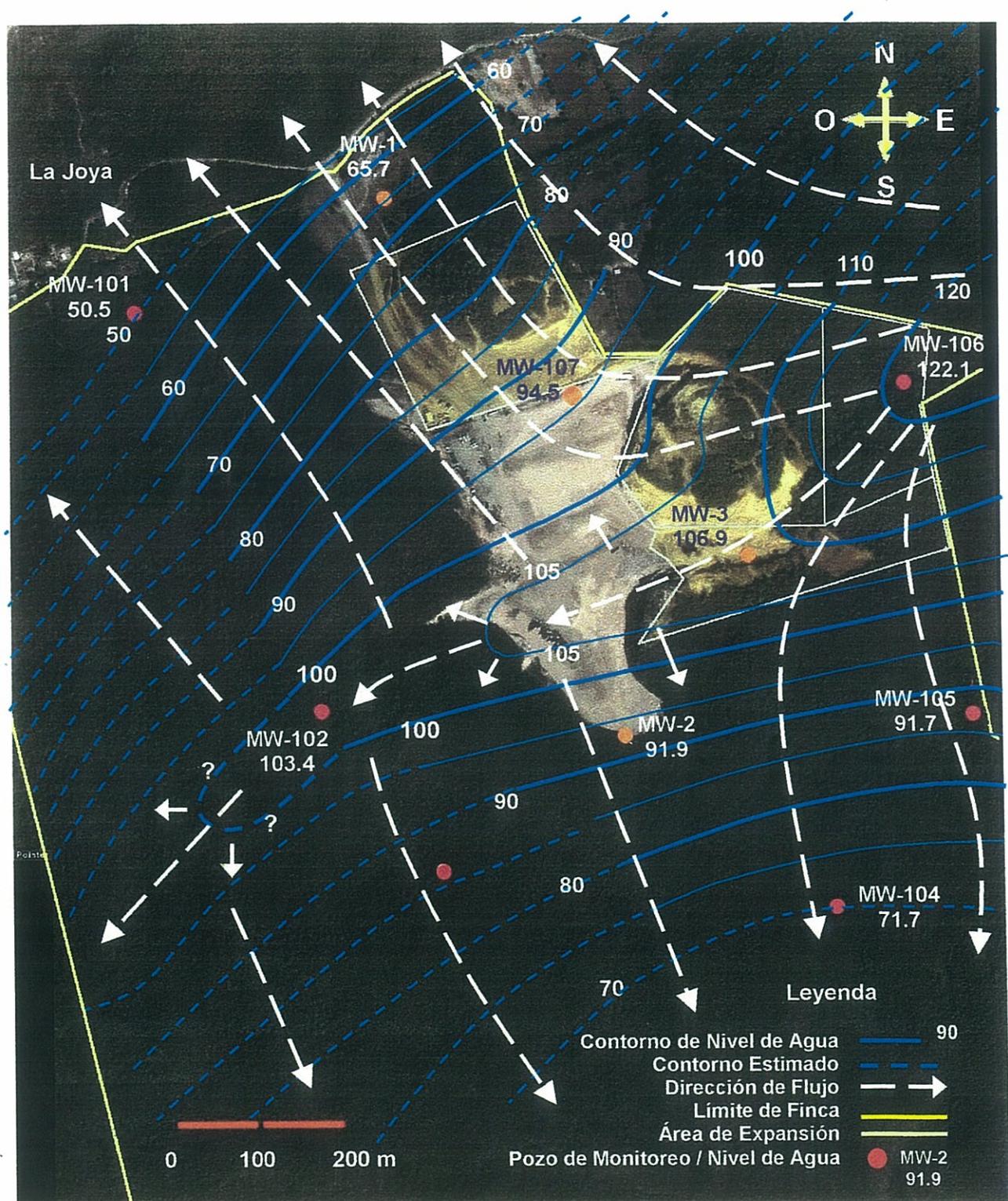
Considerando la naturaleza impermeable de la secuencia de estratos mayores que componen la **unidad basal** de la **Formación Juana Díaz** (margas calcáreas - arcilla densa - lodolita – conglomerado) (ver **Anejo**) y la no detección de otras zonas saturadas (perchadas), resulta procedente tratar el referido estrato saturado como la unidad acuífera de la localidad de estudio. Dicha unidad se detectó entre el estrato de arcilla densa (de unos **10 a 20 m** de espesor) y en las áreas fronterizas superior e inferior, extendiéndose en el plano horizontal sin interrupción aparente. La unidad, cuyo espesor fluctuó entre unos dos (**2**) a cuatro (**4**) m, exhibió variación areal en sus componentes. Secuencias de **arena-cieno** y **cieno-arena** predominan en la localidad de los pozos **MW-101** y **MW-102**, mientras que la localidad de los pozos **MW-104**, **MW-105** y **MW-106** presenta una matriz de fragmentos de roca caliza, arena y cieno.

Los datos de nivel de agua obtenidos durante el hincado de los barrenos exploratorios indican que las aguas se encuentran bajo condiciones de confinamiento. En todos los barrenos el nivel de agua registrado se elevó por encima de la unidad saturada. Dicho comportamiento está en armonía con el ambiente geológico donde ocurren las aguas subterráneas, esto es, flanqueadas por estratos impermeables.

### Patrón de Drenaje

Al igual que las aguas superficiales el movimiento y dirección de las aguas subterráneas responde a la fuerza de gravedad, por lo que la orientación del drenaje habrá de ocurrir a través de un gradiente altitudinal hacia el punto de menor elevación, en otras palabras, del área de recarga a la de descarga. El sistema presenta un potencial de recarga muy limitado dependiente del caudal de aguas meteóricas que pueda infiltrarse, condición a ocurrir preferencialmente en el afloramiento de la unidad caliza. Aún cuando los valles aluviales del **Río Yauco** y el **Río Loco** constituyen áreas de descarga potenciales, la pobre capacidad de transmisión del sistema limita grandemente aportaciones al acuífero aluvial. De hecho, las colindancias del sistema se consideran fronteras de no flujo o impermeables. Debido a que la extracción de agua de la **Formación Juana Díaz** es mínima (si alguna) se puede establecer que el sistema está en equilibrio dinámico donde la recarga es igual al volumen de recarga.

El mapa potenciométrico (**Figura 5**) muestra el patrón y dirección del drenaje que caracteriza al sistema. Las líneas de contorno concéntricas indican la presencia de un área de recarga preferencial en las partes altas del afloramiento de la **Formación Juana Díaz**. La misma actúa como divisoria del flujo de aguas subterráneas en la localidad de estudio. A tenor con los gradientes una porción del flujo discurre hacia la cuenca del **Río Yauco** y otra hacia el **Río Loco**. Determinaciones en el plano vertical evidenciaron un gradiente hidráulico mínimo lo que junto al poco espesor de la unidad acuífera resulta poco relevante su influencia en la dinámica del drenaje subterráneo.



**Figura 5.** Configuración del nivel potenciométrico y dirección del flujo de aguas subterráneas en el área del Vertedero de Yauco al 29 de marzo de 2007. (Elevación en metros sobre el nivel del mar)

## Propiedades Hidráulicas

La capacidad de transmisión y almacenaje que exhibe la unidad acuífera está dada por la **transmisividad (T)** y el **coeficiente de almacenamiento (S)**, respectivamente. El estado de confinamiento y la cobertura total del espesor de la unidad permitieron la obtención de resultados confiables y representativos (**Tabla 2**) (**Figura 6**). Los valores de transmisividad correlacionan con la naturaleza heterogénea de la unidad acuífera y con la **conductividad hidráulica (K)** esperada para unidades de naturaleza impermeable. La conductividad hidráulica exhibe variación areal (condición **heterogénea**) (ver **Anejo**) y con toda seguridad en el plano horizontal y vertical (condición **anisotrópica**).

Los valores del coeficiente de almacenamiento correlacionan con los esperados para unidades acuíferas confinadas, donde típicamente fluctúan entre  $10^{-5}$  a  $10^{-3}$  (0.00001 a 0.001) (Lohman, 1979, Driscoll, 1989). Para acuíferos **freáticos** el *coeficiente* es equivalente al rendimiento específico, fluctuando entre **0.1** a **0.30** donde **0.20** es un valor representativo para la gran mayoría de los escenarios.

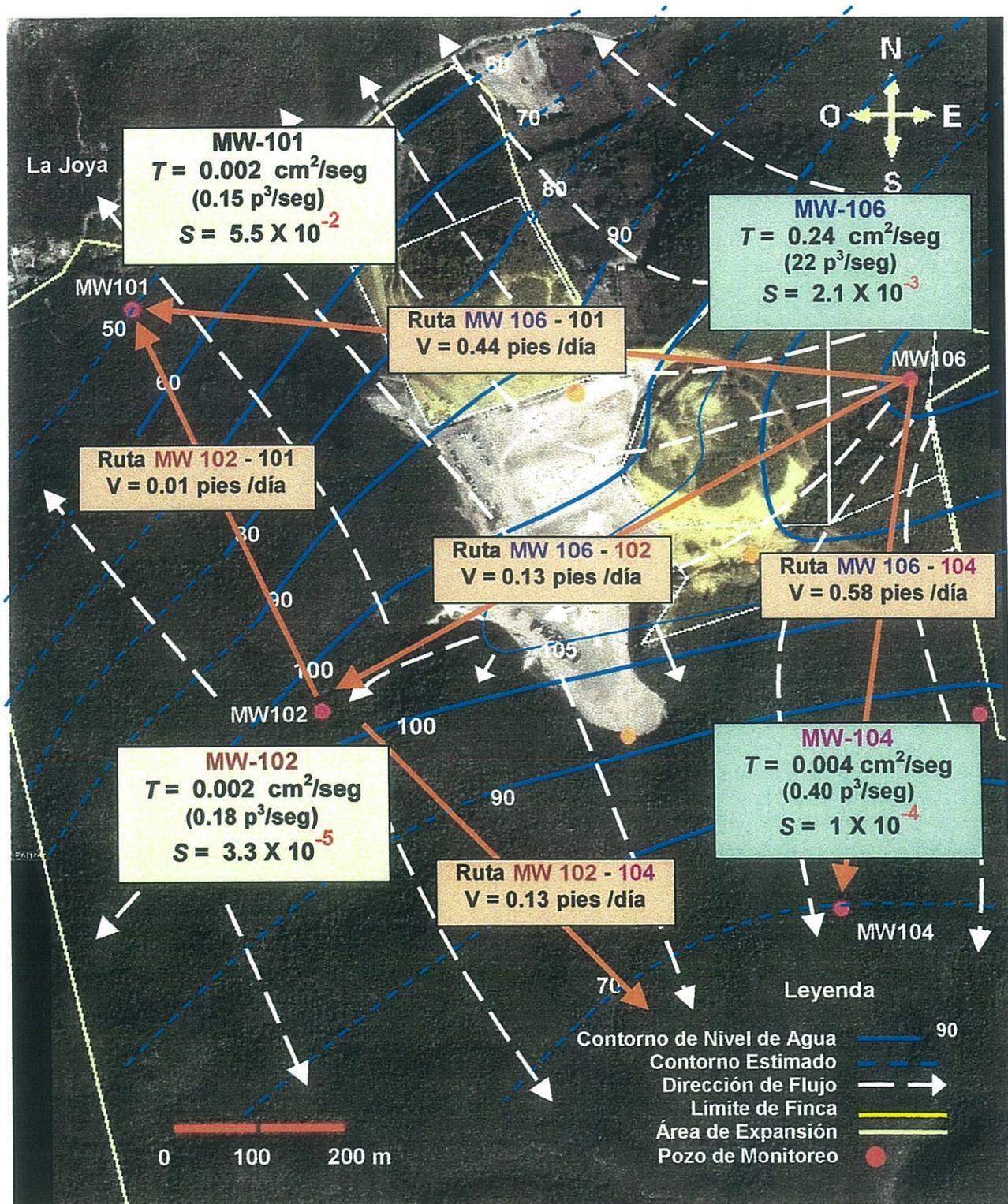
El estimado de la *velocidad promedio* entre rutas seleccionadas refleja diferencias significativas entre estas (**Tabla 3**). Se entiende que dicha condición es producto de la variabilidad areal en permeabilidad y conductividad hidráulica que exhibe la unidad acuífera. Basandonos en los datos obtenidos se estimó que un contaminante generado en el área del **MW-106** tardaría unos **14** años en llegar al área del pozo **MW-104**, **25** años al **MW-101** y **70** años al **MW-102**. La ruta entre **MW-102** y **MW-101** tardaría unos **550** años. Se enfatiza que ante un evento contaminante real se debe considerar que la más rápida razón de movimiento excederá varias veces el valor promedio aquí computado.

**Tabla 2. Propiedades hidrogeológicas de la unidad acuífera en el área de pozos de prueba seleccionados en el Vertedero Municipal de Yauco.**

Area	Condición Hidrostática	Composición de Matriz Geológica	Transmisividad			Coeficiente de Almacenamiento
			cm <sup>2</sup> /sec	p <sup>2</sup> /dia	gpd/p	
<b>MW-101</b>	Confinado	Secuencia de arena-cieno y cieno-arenoso de unos 3 m de espesor en estrato de arcilla. Entre 49.6 y 46.5 m sobre el nivel del mar (SNM)	0.002	0.15	1.09	5.5E-02
<b>MW-102</b>	Confinado	Secuencia de arena-cieno y cieno-arenoso de unos 3 m de espesor en contacto del estrato de arcilla y la lodolita. Entre 104 y 101.5 m SNM	0.002	0.19	1.43	3.3E-05
<b>MW-104</b>	Confinado	Fragmentos de roca caliza y arena de unos 4 m de espesor en lente de caliza y arcilla. Entre 54.5 y 50.3 m SNM.	0.004	0.40	2.33	1.0E-04
<b>MW-106</b>	Confinado	Fragmentos calizos y cieno arenoso con lente de roca caliza dura (0.3 m) de unos 1.5 m de espesor en estrato de caliza y arcilla. Entre 119 y 117.5 m SNM.	0.24	22	167	2.1E-03

**Tabla 3. Estimado de la velocidad promedio del flujo de aguas subterráneas entre rutas seleccionadas del Vertedero Municipal de Yauco.**

Ruta Seleccionada		Distancia (pies)	Velocidad Promedio	
de	a		pies por día	metros por día
MW-102	MW-101	2011	0.01	0.003
MW-102	MW-104	2625	0.01	0.003
MW-106	MW-101	3937	0.44	0.13
MW-106	MW-104	2953	0.58	0.18
MW-106	MW-102	3347	0.13	0.03



**Figura 6.** Transmisividad (T), Coeficiente de Almacenamiento (S) y Velocidad Promedio (V) en área de pozos de prueba seleccionados en Vertedero Municipal de Yauco. (Elevación en metros sobre el nivel del mar)

## Calidad de Agua

La corrida de calidad realizada el 29 de marzo de 2007 evidenció gran variabilidad areal en el contenido mineral o salinidad de las muestras coleccionadas a un (1) metro bajo el nivel del agua en los pozos de monitoreo (Tabla 4) (Figura 7). A tenor con la clasificación consultada (Hem, 1989) en el área del pozo **MW-101** las aguas clasifican como “**muy salinas**” (concentración de sólidos disueltos (TDS) entre 10,000 y 35,000 mg/L), en el área del pozo **MW-2** como “**moderadamente salinas**” (TDS: 3,000 – 10,000 mg/L) y como “**levemente salinas**” (TDS: 1,000 – 3,000 mg/L) en el área del pozo **MW-1**. En las áreas restantes las aguas subterráneas clasificaron como “**frescas**” (TDS < 1,000 mg/L).

Es menester destacar que la condición de salinidad en el área del pozo **MW-101** es similar a la que presenta el agua de mar. No obstante, por su distancia al litoral costero, ubicación topográfica y litológica se descarta que la mineralización de las aguas sea producto de una interacción con la cuña de agua salada. Se entiende que la condición actual es reflejo del ambiente marino donde se originó la **Formación Juana Díaz** y de la pobre capacidad de “**lavado**” que presenta la localidad de dicho pozo.

La variabilidad areal en salinidad aparenta estar asociada a la correspondiente variabilidad en permeabilidad y conductividad hidráulica que presenta arealmente la unidad acuífera. Por otra parte, la presencia de aguas subterráneas frescas correlaciona con las áreas preferenciales de recarga donde aflora la unidad caliza y se entiende que ocurre la mayor razón de infiltración.

---

## CONSIDERACIONES SOBRE EL USO PROPUESTO

A tenor con la evidencia recopilada y el análisis realizado se entiende que la utilización del área contemplada (unas 60 cuerdas) para expandir lateralmente las facilidades del **Vertedero Municipal de Yauco** no tendrá impacto detrimental alguno en la dinámica y condición actual de los sistemas hidrológicos presentes en la localidad, considerando que dicha actividad se llevará a cabo a tenor con las normas y criterios operacionales requeridos.

El grado de aislamiento hidrológico que exhiben los sistemas de drenaje superficial y subterráneo contenidos en la localidad de estudio impide que el referido proyecto constituya un factor de riesgo para las fuentes de abasto en el área, limitadas mayormente a las aguas subterráneas contenidas en los acuíferos aluviales del **Río Yauco** y **Río Loco**. Lo cierto es, que la relación e interacción hidrológica de dichos sistemas con las cuencas de drenaje correspondientes es prácticamente irrelevante.

Por otra parte, la impermeabilidad y pobre conductividad hidráulica de los estratos que componen la **Formación Juana Díaz** constituye una “barrera” natural que limita significativamente el acceso de contaminantes a la unidad saturada, así como también su transporte en el plano horizontal. Es menester indicar que el área de expansión contemplada esta limitada mayormente a terrenos con un bajo potencial de infiltración. Lo cierto es, que la localidad de estudio presenta unas características hidrológicas favorables para el uso de terreno actual.

Finalmente indicamos que el presente estudio ha contemplado los aspectos hidrológicos que permiten reconocer el alcance de un evento de contaminación y predecir su interacción con los sistemas hidrológicos de interés. Dicho conocimiento permite establecer planes de contingencia e iniciar medidas de mitigación efectivas.

**Tabla 4.** Calidad de las aguas subterráneas y nivel potenciométrico en los pozos de monitoreo del Vertedero Municipal de Yauco al 29 de marzo de 2007.

Pozo	Hora	Nivel de Agua (m) (SNM)	Tem (°C)	pH	SK (uS/cm)	TDS (mg/L)	SAL (ppm)	NO <sub>3</sub> (mg/L)
MW-101	1330	50.47	28	6.9	45,300	29,000	29.83	nd
MW-102	1430	103.44	27	7.6	820	530	0.41	nd
MW-104	1520	71.74	26	7.3	1,120	710	0.56	0.72
MW-105	1500	91.73	27	7.8	670	430	0.33	3.25
MW-106	1350	122.11	26	7.3	960	610	0.48	nd
MW-1	1330	65.68	nd	7.7	3,540	2,300	1.88	4.18
MW-2	1450	91.99	30	7.4	7,550	4,800	4.22	6.70
MW-3	1420	106.92	28	7.5	1,300	840	0.66	nd