

ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AGUA Y DATOS DE DISEÑO

ÍNDICE

1	OBJETIVO Y ALCANCE DE ESTE DOCUMENTO.....	1
2	VALORES DE CAUDALES ADOPTADOS PARA EL DISEÑO DE LOS PROCESOS	2
3	CARACTERIZACIÓN DEL AGUA QUE INGRESA A LA PTAP.	3
4	CALIDAD DEL AGUA TRATADA	10
5	VALORES ADOPTADOS PARA EL DISEÑO DE LOS PROCESOS.....	13
5.1	DISEÑO DE LOS PROCESOS DE LA LÍNEA DE AGUA	13
5.2	DISEÑO DE LOS PROCESOS DE LA LÍNEA DE LODOS	14

Lista de Tablas

Tabla 1: Valores disponibles para la caracterización de agua cruda (fuente: RIMAC SRL).....	5
Tabla 2: Valores disponibles para la caracterización de agua cruda (fuente: PROINTEC).....	8
Tabla 3: Valores Límites del efluente según Norma NB512.....	12
Tabla 4: Parámetros de diseño del tratamiento de la línea de agua.....	13
Tabla 5: Parámetros de diseño para el tratamiento de lodos.....	14

1 OBJETIVO Y ALCANCE DE ESTE DOCUMENTO

En el presente documento se resumen los parámetros y criterios que se utilizarán en el diseño de los procesos de la planta de tratamiento de agua potable (PTAP). Se proporciona aquí la totalidad de información, parámetros y criterios que permitan realizar un diseño adaptado al agua cruda que llega a la PTAP, parámetros de operación y a la calidad del efluente exigida.

2 VALORES DE CAUDALES ADOPTADOS PARA EL DISEÑO DE LOS PROCESOS

El caudal de tratamiento adoptado para el diseño de la planta, ha sido definido por el MMAyA, en función a las negociaciones con las autoridades comunales y municipales del sector donde se tienen las obras de toma para el proyecto. El caudal de tratamiento adoptado para el diseño es el de 500 l/s, con previsión de una ampliación futura mediante una línea gemela paralela a la proyectada que elevaría el caudal total de tratamiento hasta los 1.000 l/s. Dicho caudal de agua bruta será captado a partir de los embalses de Khotia Khota y Taypichaca.

3 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA QUE INGRESA A LA PTAP.

Se dispone de información de ensayos de laboratorio de los dos embalses de captación de agua bruta (Khotia Khota y Taypichaca), correspondientes al proyecto a nivel EI "Estudio de Identificación para el Mejoramiento del Abastecimiento de Agua Potable Ciudad El Alto", elaborado por Ingenieros Consultores RIMAC SRL (IC RIMAC SRL).

Los datos analíticos que aparecen son los siguientes:

	RESULTADOS IC RIMAC		Límite Norma Boliviana 512
	Khotia Khota	Taypichaca	
Requisitos físicos y organolépticos			
Características			
Color			15 UCV
Sabor y olor			----
Turbiedad	0,45	0,7	5 UNT
Sólidos totales disueltos	36	45	1000 mg/l
Sólidos en suspensión			
Requisitos químicos			
Dureza total	22	22	500,0 mg/l CaCO ₃
pH	6,33	7,09	6,5-9
Compuestos inorgánicos:			
Aluminio			0,2 mg/l
Arsénico			0,01 mg/l
Amoniaco			0,5 mg/l
Antimonio			0,01 mg/l
Bario			1,0 mg/l
Boro			0,3 mg/l
Cadmio			0,005 mg/l
Calcio	6,81	8,22	200,0 mg/l
Cianuro			0,1 mg/l
Cloro residual			1,0 mg/l
Cloruros	< 0,12	< 0,12	400,0 mg/l

	RESULTADOS IC RIMAC		Límite Norma Boliviana 512
	Khotia Khota	Taypichaca	
Cobre			1,0 mg/l
Cromo total			0,05 mg/l
Fluoruro			1,5 mg/l
Hierro total	< 0,02	< 0,02	0,2 mg/l
Magnesio	1,22	0,49	50,0 mg/l
Manganeso	< 0,02	< 0,02	0,1 mg/l
Mercurio			0,001 mg/l
Níquel			0,05 mg/l
Nitritos			0,1 mg/l
Nitratos			45,0 mg/l
Plomo			0,05 mg/l
Selenio			0,01 mg/l
Sodio	3,09	3,15	200,0 mg/l
Sulfatos	10,56	18,8	400,0 mg/l
Zinc			5,0 mg/l
Compuestos orgánicos:			
Acrilamida			0,5 µg/l
Benceno			2,0 µg/l
Benzo[a]pireno			0,2 µg/l
Cloroformo			100 µg/l
Cloruro de vinilo			2,0 µg/l
Epiclorhidrina			0,4 µg/l
Etilbenceno			300,0 µg/l
Fenol			1,0 µg/l
THM (Trihalometanos totales)			100,0 µg/l
TPH (Hidrocarburos totales)			10,0 µg/l
Tolueno			700,0 µg/l
Xileno			500,0 µg/l
Requisitos para plaguicidas			
Plaguicidas totales			0,5 µg/l
Plaguicidas individuales			0,1 µg/l
Requisitos de radiactividad en el agua potable			

	RESULTADOS IC RIMAC		Límite Norma Boliviana 512
	Khotia Khota	Taypichaca	
Radiactividad alfa global			0,10 Bq/l
Radiactividad beta global			1,0 Bq/l
Requisitos microbiológicos			
Coliformes totales	468	20	0 UFC/100ml < 2 NMP/100 ml
Escherichia coli			0 UFC/100ml < 2 NMP/100 ml
Coliformes termo resistentes	28	0	0 UFC/100 ml
Pseudomona Aeruginosa			0 UFC/100 ml
Heterotróficas Totales			500 UFC/100 ml
Clostridium Perfringens			0 UFC/100 ml
Amebas			ausencia
Giardia			ausencia
Cryptosporidium			ausencia
Parámetros de control			
Conductividad	52,7	68	1 500,0 µs/cm
Alcalinidad total	10,02	14,24	370,0 mg/l CaCO ₃

Tabla 1: Valores disponibles para la caracterización de agua cruda (fuente: RIMAC SRL)

Los resultados obtenidos muestran que desde el punto de vista fisicoquímico ambas fuentes satisfacen las exigencias de la Norma NB512 y reglamentos vigentes pues los valores se encuentran por debajo de lo especificado para agua de consumo humano.

Con relación a los parámetros microbiológicos de la tabla anterior, se observa que se requiere de una desinfección en cada una de las fuentes de agua consideradas, debido a la presencia de coliformes termorresistentes, posiblemente fruto de la existencia de animales que desarrollan su vida en el entorno de las aguas del río. Al parecer las aguas de Taypichaca tienen menos actividad antrópica y fruto de ello es la relativa poca concentración de coliformes termorresistentes.

En ese contexto, PROINTEC ha aplicado un plan de muestreo al objeto de **actualizar y completar la información** sobre la calidad del agua de las fuentes de abastecimiento, basado en las recomendaciones de la Norma y reglamentos de la NB 689 y la Norma y reglamentos de la NB 512, en relación a parámetros, frecuencias y tiempos de estudio.

Por ello, tanto en los meses de **Julio** y **Noviembre** del año 2013, como en **Enero** del año 2014, se han realizado la toma de muestras y ensayos de laboratorio en la laguna Khotia khota y Taypichaka cuyos resultados se muestran en la siguiente tabla.

Se quiere destacar que en color rojo se han resaltado aquellos valores analíticos que han resultado superiores a la normativa NB512, estando principalmente en las analíticas de Enero de 2014, por coincidir con un periodo de fuertes lluvias en fechas previas al muestreo.

	ANALÍTICA JULIO 2013		ANALÍTICA NOVIEMBRE 2013		ANALÍTICA ENERO 2014		Valor máximo aceptable Norma Boliviana 512
	Kotia khota (mg/l)	Taypi chaka (mg/l)	Kotia khota (mg/l)	Taypi chaka (mg/l)	Kotia khota (mg/l)	Taypi chaka (mg/l)	
Requisitos físicos y organolépticos							
Características							
Color			5,00	7,00	5	12	15 UCV
Sabor y olor			Ninguno		Aceptable	Aceptable	----
Turbiedad	1,24	1,48	1,73	4,93	3,38	10,9	5 UNT
Sólidos totales disueltos	30	46	46	55	47	47	1000 mg/l
Sólidos en suspensión							
Requisitos químicos							
Dureza total	22	27	22	28	22,6	27	500,0 mg/l CaCO ₃
pH	6,98	7,14			7,29	7,17	6,5-9
Compuestos inorgánicos:							
Aluminio			<0,04	<0,04	0,085	0,187	0,2 mg/l
Arsénico			<0,0010	<0,0010	0,00073	0,00144	0,1 mg/l
Amoníaco			0,11	0,11			0,5 mg/l
Antimonio			0,0035	<0,002	<0,00015	<0,00015	0,01 mg/l
Bario			<0,020	<0,020	<0,0003	0,0003	1 mg/l
Boro			0,072	0,089			0,3 mg/l
Cadmio			<0,00050	<0,00050	0,01	<0,00001	0,005 mg/l
Calcio	6,41	9,22	6,41	8,82	5,45	7,21	200,0 mg/l
Cianuro			< 0,0096	< 0,0096	<2	<2	0,1 mg/l
Cloro residual							1,0 mg/l
Cloruros	< 0,25	< 0,25	<0,25	<0,25	2,07	1,27	400,0 mg/l
Cobre			<0,05	<0,05	0,00062	0,0015	1,0 mg/l
Cromo total	< 0,05	< 0,05	<0,05	<0,05	0,0007	<0,00005	0,05 mg/l
Fluoruro	0,2	0,12	0,27	0,11	0,13	0,11	1,5 mg/l
Hierro total	< 0,05	< 0,05	<0,05	0,07	0,07	0,19	0,2 mg/l

	ANALÍTICA JULIO 2013		ANALÍTICA NOVIEMBRE 2013		ANALÍTICA ENERO 2014		
	Kotia khota (mg/l)	Taypi chaka (mg/l)	Kotia khota (mg/l)	Taypi chaka (mg/l)	Kotia khota (mg/l)	Taypi chaka (mg/l)	
Magnesio	1,46	0,97	1,46	1,46	2,18	2,19	50,0 mg/l
Manganeso	< 0,05	< 0,05	<0,05	<0,05	0,008	0,015	0,1 mg/l
Mercurio			<0,00020	<0,00020	<0,0002	<0,0002	0,001 mg/l
Níquel			<0,0050	<0,0050	0,00285	0,00211	0,05 mg/l
Nitritos	< 0,01	< 0,01	<0,01	<0,01	0,005	0,009	0,1 mg/l
Nitratos	0,65	0,62	0,65	0,57	2,658	2,215	45,0 mg/l
Plomo			<0,0050	<0,0050	0,00006	<0,00006	0,05 mg/l
Selenio			0,0085	0,0044	0,00093	0,00066	0,01 mg/l
Sodio	1,76	1,64	1,78	2,00			200,0 mg/l
Sulfatos	16,91	20,13	18,33	25,58	11	20	600,0 mg/l
Zinc	< 0,05	< 0,05	<0,05	<0,05	0,0272	0,0341	5,0 mg/l
Compuestos orgánicos:							
Acrilamida							0,5 µg/l
Benceno							2,0 µg/l
Benzo[a]pireno							0,2 µg/l
Cloroformo							100 µg/l
Cloruro de vinilo							2,0 µg/l
Epiclorhidrina							0,4 µg/l
Etilbenceno							300,0 µg/l
Fenol	< 0,15	0,15	<50	<50	<2	<2	1,0 µg/l
THM (Trihalometanos totales)							100,0 µg/l
TPH (Hidrocarburos totales)							10,0 µg/l
Tolueno							700,0 µg/l
Xileno							500,0 µg/l
Requisitos para plaguicidas							
Plaguicidas totales							0,5 µg/l
Plaguicidas individuales							0,1 µg/l
Requisitos de radiactividad en el agua potable							
Radiactividad alfa global							0,10 Bq/l
Radiactividad beta global							1,0 Bq/l
Requisitos microbiológicos							
Coliformes totales	100	350	5	58	13	50	0 UFC/100ml
							< 2 NMP/100 ml
Escherichia coli	< 1	< 1	<1	<1	<2	<2	0 UFC/100ml
							< 2 NMP/100 ml
Coliformes termo resistentes	< 1	< 1	2	< 1	<2	4	0 UFC/100 ml
Pseudomona Aeruginosa							0 UFC/100 ml

	ANALÍTICA JULIO 2013		ANALÍTICA NOVIEMBRE 2013		ANALÍTICA ENERO 2014		
	Kotia khota (mg/l)	Taypi chaka (mg/l)	Kotia khota (mg/l)	Taypi chaka (mg/l)	Kotia khota (mg/l)	Taypi chaka (mg/l)	
Heterotróficas Totales							500 UFC/100 ml
Clostridium Perfringens							0 UFC/100 ml
Amebas							ausencia
Giardia							ausencia
Cryptosporidium							ausencia
Parámetros de control							
Conductividad	54,6	62,4			65,8	67,4	1 500,0 μ s/cm
Alcalinidad total	12	14	9,00	12	9,6	12	370,0 mg/l CaCO ₃
DBO5	-	<1	2,00	2,00			0,75-1
Temperatura					11,3	10,6	
Índice de Langelier					-2,66	-2,58	

	ANALÍTICA NOVIEMBRE 2013		ANALÍTICA ENERO 2014	
	Kotia khota (mg/l)	Taypi chaka (mg/l)	Kotia khota (mg/l)	Taypi chaka (mg/l)
Oxígeno disuelto (mg/l)	6,89	7,14	6,32	6,41
	6,90	7,07		
	6,95	7,08		
	6,93	7,1		
	6,98	7,08		

Tabla 2: Valores disponibles para la caracterización de agua cruda (fuente: PROINTEC)

Los resultados obtenidos muestran que desde el punto de vista fisicoquímico ambas fuentes satisfacen las exigencias de la Norma y reglamentos vigentes pues los valores se encuentran por debajo de lo especificado para agua de consumo humano.

Únicamente el agua de Taypichaka presenta una turbiedad en Enero de 2014 ligeramente elevada respecto a la NB512, debido al arrastre de sólidos suspendidos ocasionados por las fuertes lluvias anteriores al muestreo.

Asimismo, en cumplimiento de la NB 688 relacionado con selección de fuentes, los valores de DBO5, también se encuentran dentro de los rangos permisibles (0,75 a 1,5 mg/l).

Es por tanto indudable que la calidad del agua desde el punto de vista de parámetros físico químicos es bastante buena, estando únicamente por encima de

los límites permitidos los parámetros (Coliformes totales y en un caso los termo resistentes), por lo que el tratamiento mínimo a ser adoptado podría limitarse a la desinfección. Sin embargo estas condiciones no son permanentes como se demuestra en los resultados de la última campaña de muestreo realizado por EPSAS, en las que algunos de los valores se han elevado como consecuencia de la intensidad de las precipitaciones registradas en ese periodo, motivo por el cual, como se verá más adelante, la línea de proceso propuesta es más completa y está dotada de otros procesos de tratamiento que la complementan.

En carácter corrosivo del índice de Langelier, debido a las bajas concentraciones de iones calcio y alcalinidad total, así como pH aproximadamente neutro, hace recomendable la incorporación al sistema de tratamiento de alcalinización utilizando mediante dosificación de hidróxido cálcico.

4 CALIDAD DEL AGUA TRATADA

La calidad a alcanzar en el efluente de la planta corresponde a la Norma Boliviana 512, que aunque ya ha sido expuesta en las dos tablas anteriores en la columna de la derecha a objeto de comparar con los valores del agua cruda, se expone a continuación de manera independiente:

Requisitos físicos y organolépticos	Límite Norma Boliviana 512
Características	
Color	15 UCV
Turbiedad	5 UNT
Sólidos totales disueltos	1000 mg/l
Requisitos químicos	
Dureza total	500,0 mg/l CaCO ₃
pH	6,5-9
Compuestos inorgánicos:	
Aluminio	0,2 mg/l
Arsénico	0,01 mg/l
Amoniaco	0,5 mg/l
Antimonio	0,01 mg/l
Bario	1 mg/l
Boro	0,3 mg/l
Cadmio	0,005 mg/l
Calcio	200,0 mg/l
Cianuro	0,1 mg/l
Cloro residual	1,0 mg/l
Cloruros	400,0 mg/l
Cobre	1,0 mg/l
Cromo total	0,05 mg/l
Fluoruro	1,5 mg/l
Hierro total	0,2 mg/l
Magnesio	50,0 mg/l
Manganeso	0,1 mg/l
Mercurio	0,001 mg/l
Níquel	0,05 mg/l
Nitritos	0,1 mg/l
Nitratos	45,0 mg/l

Requisitos físicos y organolépticos	Límite Norma Boliviana 512
Plomo	0,05 mg/l
Selenio	0,01 mg/l
Sodio	200,0 mg/l
Sulfatos	600,0 mg/l
Zinc	5,0 mg/l
Compuestos orgánicos:	
Acrilamida	0,5 µg/l
Benceno	2,0 µg/l
Benzo[a]pireno	0,2 µg/l
Cloroformo	100 µg/l
Cloruro de vinilo	2,0 µg/l
Epiclorhidrina	0,4 µg/l
Etilbenceno	300,0 µg/l
Fenol	1,0 µg/l
THM (Trihalometanos totales)	100,0 µg/l
TPH (Hidrocarburos totales)	10,0 µg/l
Tolueno	700,0 µg/l
Xileno	500,0 µg/l
Requisitos para plaguicidas	
Plaguicidas totales	0,5 µg/l
Plaguicidas individuales	0,1 µg/l
Requisitos de radiactividad en el agua potable	
Radiactividad alfa global	0,10 Bq/l
Radiactividad beta global	1,0 Bq/l
Requisitos microbiológicos	
Coliformes totales	0 UFC/100ml
	< 2 NMP/100 ml
Escherichia coli	0 UFC/100ml
	< 2 NMP/100 ml
Coliformes termo resistentes	0 UFC/100 ml
Pseudomona Aeruginosa	0 UFC/100 ml
Heterotróficas Totales	500 UFC/100 ml
Clostridium Perfringens	0 UFC/100 ml
Amebas	ausencia
Giardia	ausencia

Requisitos físicos y organolépticos	Límite Norma Boliviana 512
Cryptosporidium	ausencia
Parámetros de control	
Conductividad	1 500,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Alcalinidad total	370,0 mg/l CaCO_3
DBO5	0,75-1

Tabla 3: Valores límites del efluente según Norma NB512

5 VALORES ADOPTADOS PARA EL DISEÑO DE LOS PROCESOS

5.1 DISEÑO DE LOS PROCESOS DE LA LÍNEA DE AGUA

En cuanto a la línea de proceso de agua, ésta constará básicamente de los siguientes procesos:

- AIREACIÓN DE CASCADA
- MEZCLA RÁPIDA (COAGULACIÓN)
- ADICIÓN DE REACTIVO QUÍMICO COAGULANTE (SULFATO DE ALUMINIO)
- ADICIÓN DE CORRECTOR DE PH (HIDRÓXIDO CÁLCICO)
- MEZCLA LENTA (FLOCULACIÓN)
- FILTRACIÓN MEDIANTE FILTROS DE ARENA ABIERTOS
- CLORACIÓN Y DESINFECCIÓN DEL EFLUENTE (CLORO GAS E HIPOCLORITO CÁLCICO)

Para el diseño de los diferentes procesos se han utilizado una serie de valores a tener en cuenta. En las tablas siguientes se resumen los diferentes parámetros utilizados para el diseño de los distintos procesos que forman la línea de agua.

Proceso	Parámetro	Unidades	Valor
Aireación de cascada	Oxígeno disuelto a la salida	ppm	8,15
	Dosis coagulante	ppm	30
Coagulador	Gradiente de velocidad	s ⁻¹	800
	Tiempo de retención	s	120
Floculador	Tiempo de retención	min	20
Filtros de arena	Tasa de filtrado con todos los filtros en servicio	m/d	180
	Caudal aire de lavado	m ³ /m ² /h	29
	Caudal agua lavado fase esponjamiento	m ³ /m ² /h	36
	Caudal agua lavado fase final	m ³ /m ² /h	36

Tabla 4: Parámetros de diseño del tratamiento de la línea de agua

5.2 DISEÑO DE LOS PROCESOS DE LA LÍNEA DE LODOS

A continuación se realiza de manera análoga a la realizada en el apartado anterior los criterios de dimensionamiento de todos los procesos unitarios que forman parte de la línea de lodos.

La línea de lodos de la PTAP constará de los siguientes procesos unitarios:

- TRATAMIENTO DE LODOS MEDIANTE LECHOS DE SECADO

La tabla que resume los condicionantes a tener en cuenta es la siguiente:

Proceso	Parámetro	Unidades	Valor
Lecho de secado de lodos	Carga de sólidos	(kg/m ² /año)	2.000
	Tiempo de acumulación	d	<28

Tabla 5: Parámetros de diseño para el tratamiento de lodos

Para la adopción de las mismas se han utilizado tanto referencias relativas a bibliografía especializada, como valores de diseño empleados en recientes proyectos constructivos de empresas constructoras internacionales y contrastados posteriormente durante su explotación.

Se citan por tanto las siguientes referencias bibliográficas:

- Manual técnico del agua. Degrémont.
- Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua. Arboleda Valencia, Jorge A.

En cuanto a las referencias de proyectos constructivos utilizadas, se citan las siguientes:

- Proyecto y obras de la estación de tratamiento de agua potable de Pelayos de la Presa (España). 0,5 m³/s. Degrémont-Ortiz.
- Proyecto y ejecución de las obras de la ETAP del Cenajo. 6 m³/s. Degrémont-Befesa.